

REFRIGERANTES HIDROCARBUROS COMO ALTERNATIVA PARA LOS SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN

Claudio Andrea Crincoli Rondón

Miniproyecto de Ingeniería Química

Dirigido por

Prof. Rafael Álvarez Brito

Departamento de Termodinámica y Fenómenos de Transferencia

RESUMEN

La totalidad de la bibliografía consultadas para llevar a cabo este trabajo hacen referencia al hecho de que el Protocolo de Montreal y el protocolo de Kyoto sentenciaron el tiempo de vida de los CFC, los HCFC y los HFC en los sistemas de refrigeración. Los hidrocarburos se presentan como posibles sustitutos ya que son amigables con el medio ambiente y se ha demostrado que poseen mejores cualidades operacionales en sistemas de refrigeración con respecto a los gases como mayor calor latente de vaporización, mejor coeficiente de desempeño en el compresor, mejor relación de eficiencia energética y por lo tanto menos consumo de energía. En el tema de seguridad el factor de riesgo que se tiene al manejar este tipo de gases es el valor de la concentración del hidrocarburo en el aire y la intensidad de la fuente de ignición, se ha comprobado que en caso de una fuga de gas del sistema, la concentración del hidrocarburo para una habitación estándar no es peligrosa y por lo tanto su implementación como refrigerante tampoco lo es. Venezuela no se escapa de la situación y por el hecho de poseer recursos hidrocarburos en gran magnitud, se presenta una ventaja que debe ser aprovechada.

INTRODUCCIÓN

Los refrigerantes tradicionales aplicados a la refrigeración doméstica, hasta mediados de 1990, fueron los clorofluorocarbonos (CFC). El uso de estos compuestos es una de las principales causas del agotamiento de la capa ozono, por ello, su producción es controlada y limitada por etapas hasta el cese de la misma, a través de los términos del Protocolo de Montreal publicado en el año 2000¹.

Sin embargo, la industria química no tardó en desarrollar gases sustitutos de los CFCs a los que llamó sus “soluciones ambientales”. Rápidamente, comenzaron a circular los catálogos de los nuevos gases, estos gases fueron los hidroclorofluorocarbonos (HCFCs) y luego los hidrofluorocarbonos (HFCs).

La refrigeración es una necesidad de la sociedad actual y es un negocio lucrativo producir el insumo básico: gas refrigerante. Con los CFCs con fecha de vencimiento legal, la industria química lanza al mercado su gran novedad para la industria de refrigeradores y congeladores, los HFCs (hidrofluorocarbonos) y amplía el uso de los ya existentes HCFCs (hidroclorofluorocarbonos).

El Protocolo de Kioto², ratificado oficialmente a nivel internacional el pasado 15 de febrero de 2005, señala precisamente a los refrigerantes HFCs (hidrofluorocarbonos), como gases de “Efecto Invernadero”, y por lo tanto quedaron sujetos a control sobre sus emisiones. Estas emisiones favorecen el incremento de la temperatura media global del planeta. A pesar de que hoy en día, en gran parte del mundo ya no se comercializan equipos de climatización que contengan CFCs, los fluidos alternativos más utilizados en la actualidad, los hidrofluorocarbonos (HFC), tienen un impacto ambiental significativo por el efecto invernadero.

Los refrigerantes CFCs utilizados en aplicaciones domésticas inicialmente fueron reemplazados con los hidrofluorocarbonos (HFC), que tienen un potencial cero de

agotamiento del ozono (PAO). El uso de los HFC, sin embargo, también está bajo control, ya que tienen un importante potencial de calentamiento atmosférico (PCA) y se ha tratado de sustituir por refrigerantes que no contaminan, tales como los hidrocarburos (HC), en gran parte con éxito en mercados europeos y asiáticos¹⁰. El PAO de un refrigerante es un número que indica el potencial de destruir ozono con respecto al gas refrigerante R-11, que tiene un valor de 1 (Tabla 1), mientras que el PCA se refiere al potencial que tiene un gas de incrementar la temperatura media global a través del efecto invernadero, haciendo equivalencia en peso al CO₂, estos gases se clasifican en el acuerdo de Kioto como los gases de efecto invernadero². Mientras que la contribución directa al calentamiento global de estos gases refrigerantes sólo está vinculada por las fugas a través de las fallas en las tuberías o a la eliminación de los procedimientos de mantenimiento, los aportes indirectos de un cambio en el refrigerante pueden ser mucho más significativos. El uso de hidrocarburos refrigerantes representa una ventaja al medio ambiente debido a su muy reducido (prácticamente nulo) valor de PCA con respecto a los refrigerantes CFC, HFC y HCFC (Tabla 1) y que además, por ser gases naturales, no dañan la capa de ozono. En cuanto a lo operacional, se han realizado diversas investigaciones, en donde las capacidades caloríficas de los compuestos hidrocarburos (HC) han sido comparadas con los CFC, HFC y HCFC, teniendo resultados satisfactorios para los HC.

Varios países europeos han decidido realizar una fase de corto periodo para remover los refrigerantes HCFCs y HCF (de los cuales el R-134a es uno de los tipos más comunes) que además de contar con un alto potencial de calentamiento global, han demostrado ser excesivos consumidores de energía en la mayoría de las aplicaciones. Se ha demostrado a través de estudios que los sistemas con refrigerantes CFC, HCFC y HFC pueden ser fácilmente sustituidos por una mezcla de hidrocarburos¹¹.

Todos los grandes fabricantes de equipos de refrigeración en Europa han adoptado refrigerantes hidrocarburos. Los sistemas de refrigeración de cuatro de cada cinco de las más grandes cadenas de supermercados del Reino Unido han cambiado a refrigerantes HC por las evidentes ventajas con el medio ambiente. El diseño y la fabricación de refrigeradores en China está orientado a la tecnología de hidrocarburos en lugar de la Americana, que aun diseña con refrigerantes químico (CFC, HFC y HCFC).

Greenfreeze se ha convertido en la tecnología dominante en Europa. Muchos modelos de refrigeradores "Greenfreeze" están a la venta en Alemania, Austria, Dinamarca, Francia, Italia, Holanda, Suiza y Gran Bretaña. Todos los sistemas de refrigeración de las grandes empresas europeas, Bosch, Siemens, Electrolux, Liebherr, Miele, Quelle, Vestfrost, Whirlpool, Bauknecht, Foron, y AEG están basados en la tecnología Greenfreeze. 100 por ciento del mercado alemán se ha convertido a la tecnología Greenfreeze¹¹.

ANTECEDENTES

Los refrigerantes hidrocarburos han sido usados desde 1867, y en conjunto con el amoníaco fueron los refrigerantes más utilizados antes de la implementación de los refrigerantes químicos a partir del año 1930. Los gases hidrocarburos son muy usados como agentes presurizadores en envases propelentes (insecticidas, aromatizadores, aerosoles, entre otros).

Hace 15 años la industria mundial de la refrigeración y el aire acondicionado comenzó a enfrentarse con la necesidad de una reconversión forzada, a causa de que los refrigerantes utilizados (CFC, HFC y HCFC) resultan dañinos para la capa de ozono y además contribuyen en exceso con el efecto invernadero, por ello, se lograron establecer acuerdos globales de protección ambiental legalmente vinculante: el Protocolo de Montreal sobre sustancias que consumen la capa de ozono¹ y el tratado de Kyoto sobre sustancias involucradas en el efecto invernadero².

Debido a esto, los gobiernos establecieron normas las cuales prohíben la utilización de CFCs, a pesar de las presiones de las industrias químicas productoras de estos gases.

Lo que permite a los científicos enfocar sus esfuerzos en encontrar un nuevo gas refrigerante que sea más amigable con el ambiente: los hidrocarburos.

Extensa es la información que se puede encontrar acerca de los sustitutos de los gases refrigerantes contaminantes para los sistemas de refrigeración, vale la pena destacar la investigación realizada por Ho-Saeng Lee, Jung-In Yoon, Jae-Dol Kim y P.K. Bansal³ en donde demuestran a través del uso de correlaciones la ventaja que ofrecen los hidrocarburos (propano, butano y propileno) con respecto al R-22 en términos de refrigeración (coeficiente de transferencia de calor, consumo de energía, carga de refrigerante, entre otras).

Otros importantes trabajos científicos, fueron los realizados por Somchai Wongwises y Nares Chimres⁴ y por M. A. Sattar, R. Saidur, and H. H. Masjuki⁵ quienes adaptaron un refrigerador doméstico para evaluar su desempeño con mezclas de refrigerantes hidrocarburos (propano, butano e isobutano) con respecto al refrigerante R-134a, arrojando resultados muy alentadores para la alternativa ambiental.

Sabiendo que los hidrocarburos tomados en cuenta para ser los sustitutos de los actuales refrigerantes son gases altamente inflamables, un grupo de investigadores británicos como lo son L. Maclaine-cross y E. Leonardi⁶⁻⁹ tomaron la iniciativa de realizar experimentos en los sistemas de aire acondicionado de vehículos automotores y refrigeradores domésticos con la finalidad de demostrar que son de seguro manejo bajo normas estandarizadas y que además ahorran energía obteniendo mejor rendimiento que los CFCs.

Para el caso de Venezuela, la investigación para evaluar la posibilidad de la sustitución de los gases refrigerantes contaminantes es prácticamente nula.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Capa de ozono¹²: es la región de la estratósfera que contiene la mayor parte de ozono atmosférico. La capa de ozono se encuentra alrededor de 15-40 kilómetros por encima de la superficie de la Tierra, en la estratósfera. El agotamiento de esta capa de ozono conducirá a mayores niveles de incidencia de rayos ultravioleta, que a su vez causan el aumento de los cánceres de piel, las cataratas y los posibles daños a algunos organismos marinos, vegetales, y plásticos.

Potencial de agotamiento del ozono (PAO)¹²: En inglés ODP, es un número que se refiere a la cantidad de agotamiento del ozono causada por una sustancia. El PAO es la relación de los efectos sobre el ozono de un producto químico en comparación con el impacto de una masa similar de CFC-11. Así, el PAO de CFC-11 se define como 1. Otros CFC y HCFC tienen un PAO que van desde 0,01 a 1,0. Otras sustancias como los halones presentan valores de PAO alrededor de 10.

Potencial de calentamiento Atmosférico (PCA)¹²: En inglés GWP, es una medida que indica cuanto aporta una determinada masa de gas al efecto del calentamiento global. Es un valor que compara el gas en cuestión con el efecto que causa al calentamiento global una masa similar de dióxido de carbono CO₂ (por ello, el CO₂ tiene como valor definido de PCA la unidad). El PCA es calculado en un intervalo de tiempo específico correspondiente al tiempo de vida media del gas en la atmósfera. Los gases hidrocarburos tienen un valor de PCA inferior a 1.

Efecto invernadero¹²: Se llama efecto invernadero al fenómeno por el cual determinados gases, componentes de una atmósfera planetaria retienen parte de la energía que el suelo emite por haber sido calentado por la radiación solar. Afecta a todos los cuerpos planetarios dotados de atmósfera. De acuerdo con el actual consenso científico, el efecto invernadero se está viendo acentuado en la Tierra por la emisión de ciertos gases, como el dióxido de carbono y el metano, debida a la actividad económica humana.

Temperatura de autoignición o autoinflamación¹³: Es la temperatura mínima, a presión de una atmósfera, a la que una sustancia en contacto con el aire, arde espontáneamente sin necesidad de una fuente de ignición. A esta temperatura se alcanza la energía de activación suficiente para que se inicie la reacción de combustión. Este parámetro recibe también el nombre de temperatura o punto de autoencendido, temperatura

de ignición espontánea o autógena y hasta puede aparecer solamente como temperatura de ignición. Es conveniente asegurarse la no-confusión con la temperatura de inflamación o destello, especialmente si no se dispone de ambos valores determinados por ensayo ó por tablas. En caso de no disponer de ellos se observará que la temperatura de autoignición tiene unos valores muy superiores a la de inflamación y para una mayoría de compuestos se encuentra entre 200 y 700 °C. Este parámetro nos sirve de referencia para operaciones sin fuente puntual de ignición pero con una elevación importante de la temperatura, tales como tratamientos térmicos, intercambiadores de calor con aceites térmicos, motores eléctricos protegidos, etc. La temperatura de autoignición puede disminuir sustancialmente ante la presencia de catalizadores como polvo de óxido de hierro, ante atmósferas ricas en oxígeno y ante presiones elevadas.

Límites de inflamabilidad¹³: Definen las concentraciones mínimas y máximas del vapor o gas en mezcla con el aire, en las que son inflamables. Se expresan en tanto por ciento en el volumen de mezcla vapor de combustible-aire. Reciben también el nombre de límites de explosividad, ya que según las condiciones de confinamiento, cantidad, intensidad de la fuente de ignición, etc. varía la velocidad de la combustión y es común que se origine una explosión. Aunque ambos términos son intercambiables para vapores y gases inflamables, es más usual el de límites de inflamabilidad para estos dos y el de límites de explosividad para polvos combustibles. Los valores del límite inferior y superior de inflamabilidad nos delimitan el llamado Rango o Campo de Inflamabilidad o Explosividad. Para el propano se tiene que el límite inferior de inflamabilidad es 3% en volumen y 0.036 kg/m³ en concentración en el aire.

Límite inferior de inflamabilidad o explosividad¹³: Se define como la concentración mínima de vapor o gas en mezcla con el aire, por debajo de la cual, no existe propagación de la llama al ponerse en contacto con una fuente de ignición. Por ejemplo el límite inferior de inflamabilidad del propano en el aire es aproximadamente 3% en volumen. Esto significa que en 100 volúmenes de mezcla aire-propano de combustible-aire hay 3% de propano y 100 menos 3 es 97% de aire.

Tabla 1. Propiedades de diversos gases refrigerantes

Nro. de refrige.	Nombre Químico	T. de vida en la atm (Años)	PAO	PCA
R11	Triclorofluorometano	50	1	3800
R12	Diclorodifluorometano	102	1	8100
R22	Clorodifluorometano	12.1	.055	1500
R134a	1,1,1,2-tetrafluoroetano	14.6	0	1300
R290	Propano	<1 hora	0	0
R500	R-12/152a (73.8/26.2)		.74	6010
R600	Butano	<1 hora	0	0
R717	Amoníaco	N/A	0	0
R744	Dióxido de carbono	N/A	0	1

ODP: Potencial de agotamiento de ozono. Referido al R-11.
GWP: Potencial de calentamiento global. Referido al CO₂
Grupo de seguridad catalogado a través de la norma EN 378:2005.

El límite inferior de inflamabilidad está relacionado con el punto de inflamación, de forma que este último se puede definir también como la temperatura mínima a la que la presión del vapor del líquido puede producir una mezcla inflamable en el límite inferior de inflamabilidad. En otras palabras, la temperatura mínima a la que se puede producir una concentración inflamable.

Coefficiente de desempeño (COP): es la relación existente entre el calor generado o consumido por un sistema con el trabajo que se le administra al sistema.

$$COP = \frac{|Q|}{W} \quad (1)$$

CARACTERISTICAS DE LOS REFRIGERANTES HIDROCARBUROS.

Los hidrocarburos son amigables al ambiente, por ser naturales no dañan la capa de ozono ni contribuyen con el calentamiento global, además no son tóxicos para los seres humanos, por lo que se presentan como los sustitos de los ya obsoletos Clorofluorocarbonos (Cuya importación y producción fue prohibida desde el 31 de diciembre de 1995). Los refrigerantes hidrocarburos son sustancias naturales obtenidas del gas natural y de la destilación de crudos, algunas características en su utilización como refrigerantes son:

- Seguros de usar con el manejo apropiado.
- Alta eficiencia, reducen la energía utilizada en refrigeración y en sistema de acondicionamiento de aire.
- Capaces de remplazar a los sistemas actuales de refrigeración que utilizan CFC-R12, CFC-R22 y HFC-R134a sin la necesidad de cambiar sus componentes.
- Son rentables económicamente, ya que el costo de operación es más bajo que el de otro sistema de refrigeración

SITUACIÓN ACTUAL DE LOS HIDROCARBUROS COMO ALTERNATIVA REFRIGERANTE.

Al igual que muchos productos de uso común como la gasolina, el gas natural y la electricidad, el uso de refrigerantes hidrocarburos requiere de sentido común y la aplicación de los procedimientos de seguridad adecuados. Es importante entender cómo el volumen de hidrocarburos refrigerantes está implicado en las aplicaciones del sistema de refrigeración del aire acondicionado de vehículos de motor hoy en día. Un carro con sistema de aire acondicionado contiene aproximadamente una hielera completa como aproximación del volumen que ocupa el líquido refrigerante, y una pequeña nevera contiene aproximadamente una taza de café. Australian Standard (AS) 1596 - 1989 (GLP de almacenamiento y manipulación) estableció directrices de seguridad para el almacenamiento y manipulación de productos de gas licuado de petróleo, que incluyen hidrocarburos refrigerantes.

Tabla 2. Carga de refrigerante hidrocarburo asociada a diversos tipos de aplicaciones.

Categorías	Ejemplos	Cantidades
A (Doméstica/Pública)	Hospitales, teatros, escuelas, supermercados, hoteles.	<1.5 kg para un sistema sellado.
		<5 kg en cuartos de maquinarias especiales o en sistemas indirectos al aire libre.
B (Comercios/Áreas Privadas)	Oficinas, pequeños negocios, restaurantes, lugares de manufactura o espacios de trabajo.	<2.5 kg para sistemas sellados.
		<10 kg en cuartos de maquinarias especiales o en sistemas indirectos al aire libre.
C (Industrias/ Áreas restringidas)	Tiendas frías, áreas de acceso restringidos en plantas y supermercados	<10 kg en espacios ocupados por personas.
		<25 kg si se encuentran altas presiones en espacios localizados en las áreas de maquinaria.
		No existe límite si el refrigerante es contenido en una maquinaria especial para su utilización.

Australian Standard AS 1677 (Seguridad en Refrigeración y Aire Acondicionado), recientemente concluido y que pronto serán puestos en circulación, incluye procedimientos para el uso de todos los refrigerantes, incluida la de los hidrocarburos¹⁰.

Investigaciones realizadas por ingenieros de evaluación de riesgos, tales como el Grupo de Arthur D. Little indican un muy bajo riesgo para los ocupantes de vehículos de motor de la liberación accidental de hidrocarburos refrigerantes. La Escuela de Ingeniería Mecánica y Fabricación de la Universidad de Nueva Gales del Sur, es un líder mundial en la aplicación de estos productos, y han documentado la seguridad y eficiencia de

los hidrocarburos refrigerantes en vehículos de motor con aire acondicionado⁶⁻⁹. También existe evidencia abrumadora de los beneficios para el medio ambiente y la seguridad de los refrigerantes HC.

El punto más importante que hacer es que hay una falta total de pruebas técnicas para refutar el caso de los hidrocarburos refrigerantes como sustitutos de los gases refrigerantes contaminantes.

En este momento el suministro de refrigerantes CFC en los países Europeos y Australia está prácticamente agotado. Los HCFC (refrigerantes hidroclorofluorocarbonos) hacen menos daño a la capa de ozono que los CFC, pero todavía son perjudiciales ya que representan una de las causas del calentamiento global. Actualmente se tiene la intención de que los HCFC se eliminen en el año 2015 en los países desarrollados¹.

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE SISTEMAS SEGUROS.

Los compuestos hidrocarburos son altamente inflamables, pero no son tóxicos. Esto les da una clasificación "A3" de acuerdo a la norma BS EN378. Se hace referencia a esta norma estandarizada, pues detalla los requerimientos para el uso seguro de refrigerantes inflamables en aplicaciones comerciales e industriales. Para más información detallada en estos requerimientos de seguridad, se puede referenciar el Instituto de Códigos de Seguridad en Refrigeración para refrigerantes A3¹⁰.

A continuación se presentan algunos requerimientos de seguridad que deben ser considerados en el diseño y la construcción de todas las instalaciones de refrigeración y aires acondicionados, en función de la flamabilidad de los refrigerantes hidrocarburos a utilizar.

Carga permisible del refrigerante.

El factor limitante asociado al uso de hidrocarburos como refrigerantes, es precisamente el tamaño de la carga, la categoría de aplicación y el tamaño del cuarto.

Sistemas con cargas de 0.15 kg o menos pueden ser instalados en cualquier habitación. Sistemas con carga mayor a 0.15 kg deben ser estudiados de tal manera que cualquier pérdida de refrigerante del sistema no aumente su concentración mas allá de la permitida por su límite de flamabilidad.

El requerimiento del tamaño de la carga se detalla a continuación para la norma BS EN378 (Tabla 2).

Medidas de seguridad

Aspectos básicos de seguridad para trabajar con cualquier refrigerante:

- Cuando se maneja volúmenes de refrigerantes bien sea para su carga o descarga del sistema de refrigeración, es indispensable poseer guantes, gafas y vestimenta que cubra todo el cuerpo para evitar el contacto.
- El contacto con refrigerantes líquidos puede causar quemaduras que deben ser tratadas con abundante agua. Es necesaria atención médica inmediata.
- Los refrigerantes son generalmente más pesados que el aire, por lo que se depositan en el fondo del

refrigerador e incluso en sótanos, por lo que es recomendable su uso en espacios ventilados.

- El gas refrigerante puede causar asfixia. Si alguna persona es afectada, se debe llevar a un espacio abierto, suministrarle respiración artificial y es necesaria atención médica inmediata.

Debido a la inflamabilidad de los hidrocarburos se requiere de consideraciones adicionales:

- Mezclas de hidrocarburos son inflamables en concentraciones entre 1.95% y 9.1%.
- Si ocurre un incendio a causa de fuga de refrigerante hidrocarburo, se debe apagar mediante el uso de polvo seco tipo extintor. Si el incendio es mayor se debe aplicar la alarma para el caso.
- Si grandes cantidades de hidrocarburo refrigerantes son liberadas a la atmósfera, deben ser dispersadas con aire o agua en spray. El área debe ser evacuada y acondicionada inmediatamente para evitar incendios (apagar fuentes de calor e interruptores de corriente eléctrica).

Cuando se diseñan los nuevos sistemas de bombas de calor o aires acondicionados con propano, R290 o con otros refrigerantes inflamables, se deben tomar las precauciones de seguridad para garantizar la seguridad de operación y mantenimiento. Otros factores que son necesarios considerar con refrigerantes inflamables serán los requisitos de recuperación de refrigerantes. Aunque los refrigerantes hidrocarburos tienen un mínimo impacto en el calentamiento de la Tierra, siempre habrá una necesidad de requerir su recuperación durante el mantenimiento del sistema y al final de la vida útil del producto con el fin de proteger los equipos o de reciclar el producto.

En caso de los nuevos equipos se ha indicado que la seguridad de los consumidores está cubierta por el principio de responsabilidad de los fabricantes del sistema, que es legalmente responsable por el riesgo que corre el usuario final para un uso normal del sistema o dispositivo. Este es un tema muy importante a considerar debido a que las cargas de refrigerantes que se manejan en sistemas domésticos es lo suficientemente baja para brindar condiciones seguras de operación, aun existe la inquietud en el consumidor sobre los posibles riesgos que incurre el hecho de tener un refrigerante inflamable en sus equipos de refrigeración.

Códigos de práctica.

Existen varios códigos y medidas de seguridad que son apropiados para el uso de refrigerantes inflamables asociados a ciertos equipos. Debido a las múltiples investigaciones que se realizan en estos aspectos de seguridad, las reglamentaciones y códigos de seguridad varían con el tiempo para optimizar su función de prevenir riesgos. Es recomendable revisar periódicamente las variaciones que surjan de las normas de seguridad.

Generalmente, los sistemas de refrigeración deben estar diseñados y construidos en concordancia con los requerimientos de la maquinaria (volumen que puede manejar, temperaturas deseadas a alcanzar, entre otras).

Los siguientes documentos presentan la situación del manejo de la presión en sistemas industriales y comerciales:

- BS 4434.

- BS EN 378.

- Instituto de refrigeración de códigos de prácticas para refrigerantes A3.

Comúnmente los sistemas de refrigeración domésticos tienen otras medidas de seguridad, bien puede ser relacionadas a asuntos eléctricos involucrados en su utilización. Algunos requerimientos para este tipo de sistema son detallados en los siguientes documentos:

- BS EN 60335-2-24.
- BS EN 60335-2-40.
- BS EN 60335-2-89.

Cabe destacar que el código BS EN 60335-2-24 es aplicado para sistemas que usan hasta 150 gramos de refrigerante inflamable. Para más información se puede referenciar nuevas regulaciones del Instituto de normas británico para refrigerantes inflamables y aires acondicionados¹⁴.

Cuando grandes cantidades de refrigerante inflamable es empleado, es apropiado considerar normas relacionadas con los riesgos de operación. Estas normas están vinculadas a una gran lista de aplicaciones comerciales e industriales en donde se tiene a la mano una aproximación general de prevención de riesgos por el uso de estos refrigerantes inflamables:

- BS EN 1127-1.

En general, la principal diferencia entre los sistemas de seguridad en los equipos de refrigeración con sustancias no inflamables y con sustancias inflamables, es que con los últimos, existe el factor de riesgo a raíz del montaje eléctrico utilizado por la maquinaria de operación. Por la variedad de riesgos que existen en presencia de corriente eléctrica y gases inflamables, algunas normas de seguridad estandarizadas para este requerimiento son:

- IEC 60079-0
- BS EN 60079-10.
- BS EN 60079-11.
- BS EN 60079-14.
- BS EN 60079-15.

Propiedades de inflamabilidad de los hidrocarburos.

Estas propiedades, proporcionan los datos necesarios para realizar el diseño seguro de los sistemas de refrigeración que utilizan hidrocarburos como refrigerantes. Algunos parámetros que se pueden calcular a través de estas propiedades son la carga de refrigerante, el flujo de ventilación y la determinación del rango de temperaturas de operación de los componentes del sistema.

Tabla 3. Propiedades de inflamabilidad de gases hidrocarburos refrigerantes.¹⁹

Refrigerante	Nro.	Límite Inf. De Inf, (L.I.I)		Temperatura de autoignicion (°C)
		%(vol.)	ρ (kg/m ³)	
Propano	R-290	3.0	0.037	515
Butano	R-600	2.1	0.038	470
Isobutano	R-600a	1.8	0.043	460
Propileno	R-1270	2.5	0.043	455

Cálculo del tamaño permisible de carga de refrigerante.

Si la carga de refrigerante es mayor de 0.15 kg, entonces, de existir una fuga en el sistema, se debe establecer que la concentración del refrigerante en el medio no supere los valores establecidos en los límites de inflamabilidad (aproximadamente 0.008 kg/m³). Por otra parte, la carga de refrigerante está determinada por el volumen del cuarto donde está contenido.

Se puede determinar a través de la ecuación (2):

$$M_r = 0.2 \times V_{hab} \times \rho(L.I.I.) \quad (2)$$

El factor 0.2, corresponde a un límite de inflamabilidad (20%) crítico para fluidos inflamables de refrigeración que está contenido en la norma EN378:2005.

De otra manera, si se conoce la carga, se puede despejar el volumen de la habitación de la ecuación anterior.

Evitar la estratificación.

En el caso de una fuga catastrófica, es posible que la estratificación del refrigerante ocurra, lo que conlleva al aumento de concentraciones inflamables. Con el fin de evitar que esto ocurra el ventilador del sistema de refrigeración asociado al sistema debería ser capaz de ofrecer una corriente de aire mínima que impida la estratificación. Los ventiladores operan cuando el ciclo se encuentra en operación, es aquí donde puede ocurrir la fuga, caso contrario cuando el ciclo no se encuentra en funcionamiento. En la ecuación (3) se detalla el cálculo del flujo de aire:

$$\dot{V}_{aire} = C \times \frac{M_r}{(L.I.I.)} \quad (3)$$

Donde el valor de la constante C corresponde a 17 si el aire del ventilador del evaporador proviene del interior de la habitación donde opera el ciclo, ó tiene un valor de 20 si el aire del ventilador del condensador proviene del interior de la habitación.

PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DE LOS REFRIGERANTES

En esta sección se muestran las propiedades de los refrigerantes hidrocarburos propano (R-290), isobutano (R-600a) y butano (R-600) para compararlas con las propiedades del refrigerante R-22, R-12 y R-134^a que es utilizado actualmente en muchas industrias.

Punto normal de ebullición

Se refiere a la temperatura a la cual el fluido de interés ebulle a una presión total de una atmósfera. Para un fluido con bajo punto ebullición normal se tiene que existirán altas

presiones a altas temperaturas, todo lo contrario para un fluido con un alto punto de ebullición normal.

Parámetros Críticos

Los parámetros críticos: temperatura y presión, determinan el punto crítico de un fluido. Valores de temperatura y presión por encima del punto crítico no son validos para ciclo simple de compresión, sobreentendiendo el hecho de que por encima de este punto la fase líquido y vapor no existen, y por lo tanto no se puede llevar a cabo el fenómeno de condensación.

En la tabla 4.1 y 4.2 se pueden observar los valores del punto de ebullición normal (°C), de la temperatura critica (°C), de la presión critica (bar) de los hidrocarburos en estudio (propano, isobutano y butano) y del refrigerante R-22, R-12 y R-134^a. Donde se observa que existe gran similitud entre los valores críticos del propano y los valores críticos del R-22.

Tabla 4.1 Datos de Punto de ebullición normal y valores críticos para el propano, butano, isobutano.

Refrig.	R-290	R-600	R-600a
PEN (°C)	-42.1	-0.90	-11.7
T. C. (°C)	96.8	152	135
P. C. (bar)	42.5	38.0	36.5

Tabla 4.2 Datos de Punto de ebullición normal y valores críticos para el propano, butano, isobutano.

Refrig.	R-22	R-12	R-134a
PEN (°C)	-40.8	-29.1	-40.7
T. C. (°C)	96.2	112	101
P. C. (bar)	49.9	41.2	40.7

Presión de saturación

La figura 1 muestra las presiones de saturación de los hidrocarburos y el refrigerante R-22.

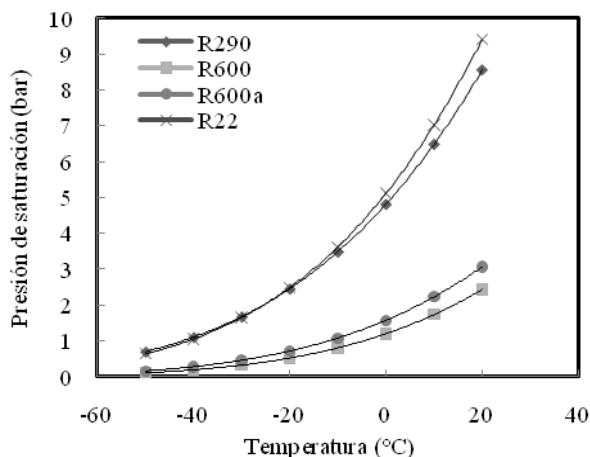


Figura 1. Presión de saturación de los refrigerantes hidrocarburos y el refrigerante R-22.

Como se puede observar, el refrigerante R-22 y el propano poseen una tendencia similar en el incremento de la presión de saturación a través del aumento de la temperatura. Lo que implica que el propano tendrá menores presiones de operación que el R-22 en referencia a una temperatura.

Calor latente de vaporización

El calor latente de vaporización es la diferencia en entalpías entre el líquido saturado y el vapor saturado de una sustancia a una presión o temperatura dada. Este valor determina el calor de condensación o evaporación disponible por cada kg de fluido a ciertas condiciones de presión y temperatura. Este dato puede ser utilizado para calcular el flujo de masa de refrigerante requerido (Ecuación 4).

$$\dot{Q} = \dot{m} \times \Delta h_{\text{vaporización}} \quad (4)$$

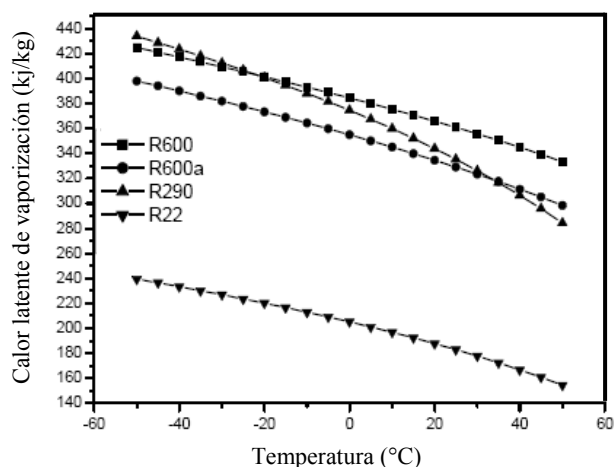


Figura 2. Calor de vaporización de fluidos puros vs. Temperatura de saturación.¹⁹

De la figura 2 se obtiene que los hidrocarburos tienen alrededor de dos veces el calor latente que el R-22. Esto indica que el flujo másico circulando a través del sistema de refrigeración con refrigerantes hidrocarburos requerido será siempre aproximadamente la mitad del requerido por un sistema de refrigeración con R-22.

Densidad de líquido

Esta propiedad permite establecer la relación entre la masa de refrigerante que circula en un volumen determinado del sistema.

En la figura 3 se muestra la densidad del propano, del butano y del refrigerante R-22.

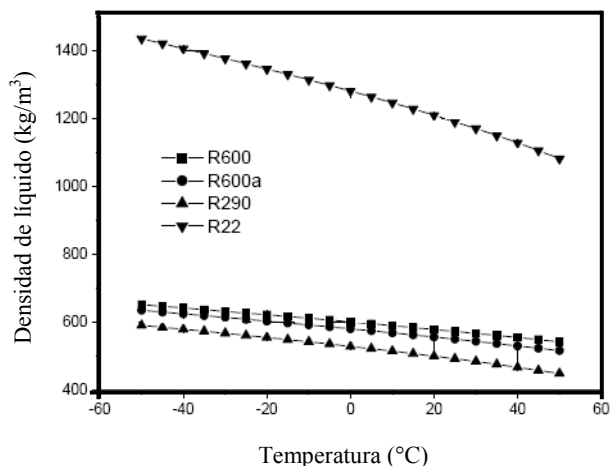


Figura 3. Densidad de los compuestos en fase líquida a diferentes temperaturas.¹⁹

Se observa de la figura 3, que los hidrocarburos presentan menor densidad que los refrigerantes R-22 y R-134a, lo que implica que los primeros requieren menos carga en los sistemas de refrigeración que los últimos.

Coefficiente de desempeño (COP)

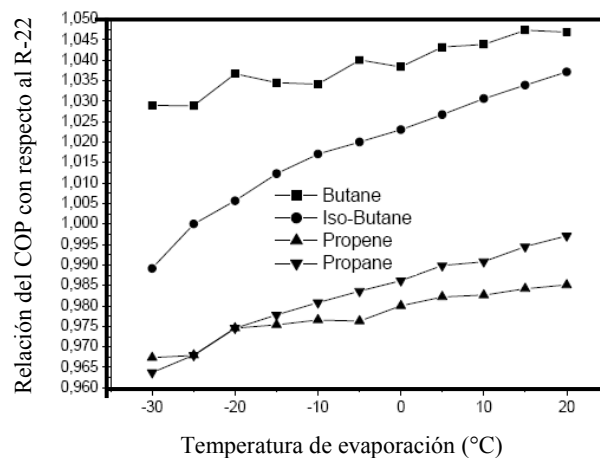


Figura 4. Relación del COP de diversos hidrocarburos con respecto al R-22.¹⁹

Se puede observar de la figura 4, que el butano y el isobutano muestran valores ligeramente del COP mayores que el R-22, mientras que el Propano y el Propeno presentan valores tan solo un poco por debajo del compuesto en relación, -2.5% para el caso de bajas temperaturas de evaporación y alrededor de -1% para valores de altas temperaturas de evaporación. Para todos los casos la pequeña diferencia entre los valores de COP con el R-22 es de gran consideración.

CONSUMO ENERGÉTICO DE LOS SISTEMAS REFRIGERANTES CON HIDROCARBUROS.

I.E. Maclaine-cross y E. Leonardi, realizaron un estudio demostrando que los sistemas de refrigeración domésticos que utilizan hidrocarburos como fluidos refrigerantes, consumen alrededor de 20% menos de energía que aquellos sistemas que utilizan Fluorocarbonos.⁹

En su investigación, se observa que el refrigerante R-600^a (isobutano), representa la mejor opción para sustituir a los refrigerantes fluorocarbonados en los sistemas domésticos de refrigeración.

La tabla 5 muestra el consumo energético de refrigeradores domésticos con temperatura interna de 5°C y temperatura ambiente de 25°C.

Tabla 5. Consumo energético de refrigeradores domésticos con temperatura interna de 5°C y temperatura ambiente de 25°C.⁹

Marca	Mod.	Refrig.	Capacidad (L)	Consumo (kWhr/24 hr)
Uk	A	R12	129	0.75
Uk	B	R12	160	0.71
Liebher	KT1580	R600a	155	0.38
Siemens	KT15RSO	R600a	144	0.52

Como se observa, los sistemas que utilizan R-600^a como refrigerante, consumen menos energía que aquellos que utilizan R-12, en el caso del equipo Siemens KT150RSO, se tiene que el consumo energético es aproximadamente 50% menor que aquel que requiere el equipo UK modelo A.

DISCUSIÓN

Es de resaltar, que la totalidad de las investigaciones consultadas para llevar a cabo este trabajo hacen referencia al hecho de que el tratado de Montreal sentenció el tiempo de vida de los CFC, los HCFC y los HFC en los sistemas de refrigeración a nivel doméstico e industrial.

Con los hidrocarburos postulados como la alternativa ambiental para la sustitución de los ya mencionados gases contaminantes, se abrió un canal para que investigadores y científicos probaran las aptitudes y las cualidades de éstos en sistemas de refrigeración, y con ello evaluar la posibilidad de que sean en realidad la opción a tomar en cuenta para lograr la sustitución efectiva de los clorofluorocarbonos, de los hidroclorofluorocarbonos y de los hidrofluorocarbonos de los sistemas de refrigeración.

Son más de 15 años de investigaciones, papers y trabajos de laboratorio que se pueden encontrar en la literatura técnica y científica en función del tema de los hidrocarburos (en especial el propano) como la alternativa para relevar a los CFC, HFC y HCFC de los sistemas de refrigeración. En estos se estudian diversas variables para poder ser catalogados como sustitutos eficientes de los gases contaminantes, entre estas se puede mencionar sus propiedades químicas y termodinámicas, las cuales han dado resultados muy alentadores al compararlas con gases como el R-134^a y el R-22, y las condiciones de seguridad que se requieren para poder ser utilizados sin inconvenientes.

El impacto ambiental de los gases hidrocarburos permite que estos mantengan una ventaja inmensurable con respecto a los CFC, los HFC y los HCFC, ya que los primeros no dañan la capa de ozono, no contribuyen con el calentamiento global y su tiempo de permanencia en la atmósfera es nulo con respecto a los últimos mencionados.

Es el tema de la seguridad quien presenta mayor agudeza en el análisis de los resultados obtenidos en las investigaciones, pues al fin y al cabo, los hidrocarburos son gases inflamables, y el hecho de pensar que operaran en un ciclo de refrigeración a altas condiciones de presión y temperatura puede resultar inquietante.

Lo cierto es que para sistemas de refrigeración domésticos, donde la carga requerida de refrigerante (150 g) es pequeña con respecto a un sistema industrial, está demostrado que las condiciones de operación son totalmente seguras.

Para evaluar el nivel de seguridad de un equipo de refrigeración que opera con gases hidrocarburos como refrigerante se debe tomar en cuenta el volumen de la habitación donde se encuentra el sistema y con ello evaluar la posibilidad de que el gas alcance los valores del L.I.I. en el caso de una fuga y al mismo tiempo considerar si existen posibles fuentes de ignición (Fuego directo o indirecto, cortocircuito eléctrico, chispa, entre otros), en resumen, es el valor de la concentración del hidrocarburo en el aire que en presencia de alguna fuente de ignición pudiese ser la causa de la inflamabilidad del gas en cuestión.¹⁰

Para citar un ejemplo de lo seguro que es operar sistemas de refrigeración con hidrocarburos como refrigerantes, se puede establecer la relación entre la densidad de la carga de refrigerante que requiere una nevera (150 g) situada en una habitación común (9m³ aproximadamente) y la carga de propano que existe en una lata de insecticida de 400 ml cuya composición de gas propelente (propano) es de aproximadamente 97%, en pocas palabras, se tiene propano puro en forma de aerosol, mientras que de existir una fuga de refrigerante en la nevera, la concentración del propano en la habitación alcanza aproximadamente el valor de 0.02 kg/m³ (aplicando la ecuación 1), un valor por debajo del L.I.I. del propano.

La ecuación 2 permite calcular el flujo de aire requerido por el ventilador del compresor para evitar que se acumule la concentración de gas en el aire que satisfaga la condición de peligrosidad establecida por el límite inferior de inflamabilidad.

Con múltiples estudios, normas, medidas y códigos de seguridad establecidos, queda demostrado que los refrigerantes hidrocarburos satisfacen esta condición para que los sistemas de refrigeración domésticos, industriales y comerciales puedan ser diseñados e implementados.

En cuanto a las propiedades termodinámicas, los hidrocarburos presentan cualidades interesantes con respecto al R-22 y el R-134^a, la más importante de resaltar es el calor latente de vaporización, que puede ser observada detalladamente en la figura 2.

De la figura 2 se puede observar que los valores de calor latente de vaporización son más altos para el butano, isobutano y propano, que los valores observados para el refrigerante R-22 a cualquier temperatura.

La relación se encuentra alrededor del doble del valor de calor latente de vaporización para el butano y el resto de los hidrocarburos con respecto al R-22, lo que permite inferir, que la carga requerida de hidrocarburo para un sistema de refrigeración que opera con refrigerante R-22, será aproximadamente la mitad del último.

De la figura 3 se observa que la densidad de los hidrocarburos es mucho menor que la de los refrigerantes clorofluorocarbonados, representando una ventaja importante en el sentido que se presentan menores caída de presión en el sistema y que además el trabajo de succión en el compresor es menor, por lo que se obtiene una eficiencia energética significativa, que para el propano puede llegar a ser en algunos casos 20% menos del consumo energético requerido para un sistema con R-22. Además, para las condiciones de saturación del propano, el tener una menor densidad puede permitir que se opere a mayores temperaturas de condensación y por ende se pueden obtener mayores temperaturas de descarga en el sistema.¹⁹

Se puede observar de la figura 4, que el butano y el isobutano muestran valores ligeramente del COP mayores que el R-22, mientras que el Propano presentan valores tan solo un poco por debajo del compuesto en relación, -2.5% para el caso de bajas temperaturas de evaporación y alrededor de -1% para valores de altas temperaturas de evaporación. Para todos los casos la pequeña diferencia entre los valores de COP con el R-22 es de gran consideración.

Por otra parte, numerosos estudios han demostrado que los sistemas con refrigerantes hidrocarburos consumen menos energía que los sistemas con gases contaminantes.⁹

Recordando que los gases clorofluorocarbonados y sus afines tienen fecha de salida¹ de los sistemas de refrigeración, empresas como Greenfreeze[®], Hychill[®] y Northcutt[®] entre otras, han sido pioneras en el mercado de gases hidrocarburos como refrigerantes, alegando que sus fluidos consumen menos energía y son menos corrosivos con respecto a los CFC y HFC, afirmaciones que han sido demostrada por una amplia gama de investigaciones.

La UNEP ha establecido un estimado de sustitución de los CFC en el planeta, en donde indica que para el año 2040, ya los países menos desarrollados habrán sustituido los gases de sus sistemas de refrigeración.

Venezuela, un país con grandes recursos de hidrocarburos, y con clima cálido tropical en la mayoría de su territorio, no tiene en la actualidad investigaciones sustentadas en este tema, para ser pioneros en América Latina es de vital importancia el desarrollo de investigaciones y la implementación de estos gases dentro de los sistemas de refrigeración.

CONCLUSIONES

- Los hidrocarburos por ser compuestos naturales, no dañan la capa de ozono ni contribuyen de forma significativa en el efecto del calentamiento global.
- Los hidrocarburos se presentan como la mejor opción en refrigerantes para sustituir a los CFC, HFC y HCFC.
- Los hidrocarburos presentan mejores cualidades operacionales como mayor calor latente de vaporización, menor densidad en fase líquida, mejor coeficiente de desempeño en el compresor, mejor relación de eficiencia energética y por lo tanto menos consumo de energía.
- Puede descartarse el argumento de que los gases son peligrosos para operar en las condiciones de los sistemas de refrigeración domésticos.
- Su producción es menos costosa y su aplicación también, pues los sistemas de refrigeración con gases hidrocarburos requieren de menor caudal másico que aquellos que utilizan refrigerantes CFC, HFC o HCFC.
- El propano se presenta como la mejor alternativa dentro de los gases hidrocarburos, ya que tienen mejores temperaturas de condensación y evaporación que los CFC y HCFC, por lo tanto requiere de menores áreas de transferencia de calor en los equipos, aunque se ha demostrado que mezclas de este con butano han dado muy buenos resultados en refrigeradores domésticos.
- Por las condiciones climáticas de Venezuela y el carácter de ser un país con grandes cantidades de recursos de hidrocarburos, es necesario llevar a cabo investigaciones en el área de refrigerantes hidrocarburos, con ello lograr aportar resultados a la ciencia y ser guía ante otros países de la América Latina para la sustitución de sus tecnologías.

RECOMENDACIONES

- Se debe corroborar los resultados de las investigaciones consultadas a través de procedimientos experimentales en la Universidad Simón Bolívar.
- Desarrollar prácticas en las unidades del laboratorio de fenómenos de transporte de la Universidad Simón Bolívar, que comparen el coeficiente de transferencia de calor de los hidrocarburos con respecto a los refrigerantes convencionales.

- Llevar a cabo el montaje experimental del diseño de un equipo de refrigeración con propano elaborado por Pedro Hernández S, Pedro López M y María Alejandra Soto E., en la Universidad Simón Bolívar.
- Desarrollar un código de seguridad de aplicación de gases refrigerantes hidrocarburos en las instalaciones de los laboratorios de la Universidad Simón Bolívar.

NOMENCLATURA

°C	Centígrados
CFC	Cloro-fluoro-carbono
COP	Coficiente de desempeño
$\Delta h_{\text{vaporización}}$	Diferencia entre la entalpía de vapor saturado y líquido saturado.
HCFC	Hidro-cloro-fluoro-carbono
HFC	Hidro-fluoro-Carbono
Kg	Kilogramos
L	Litros
L.I.I.	Límite inferior de inflamabilidad
L.I.E.	Límite inferior de explosividad
L.S.I.	Límite superior de inflamabilidad
L.S.E.	Límite superior de explosividad
	Flujo másico (kg/s)
M	Metros
M_r	Masa de refrigerante (m^3)
P	Densidad (kg/m^3)
PAO	Potencial de agotamiento de ozono
P.C.	Presión crítica (bar)
PCA	Potencial de calentamiento atmosférico
P.E.N.	Punto de ebullición normal
Q	Calor (kJ)
	Flujo de calor (kJ/s)
ρ	Densidad (kg/m^3)
T.C.	Temperatura crítica (°C)
	Flujo volumétrico de aire (m^3/s)
V_{hab}	Volumen de la habitación (m^3)
Vol.	Volumen
W	Trabajo (kJ)

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1.-United Nations Environment Programme. “The Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer”. Publicado en el año 2000.
- 2.-Programa Ambiental de las Naciones Unidas. “Protocolo de Kioto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático”. Hecho en Kioto el 11 de diciembre de 1997.
- 3.- Ho-Saeng Lee, Jung-In Yoon, Jae-Dol Kim, P.K. Bansal. 2005. “Characteristics of condensing and evaporating heat transfer using hydrocarbon refrigerants”. Applied Thermal Engineering 26 (2006) 1054–1062.
- 4.- Somchai Wongwises, Nares Chimres. 2004. “Experimental study of hydrocarbon mixtures to replace HFC-134a in a domestic refrigerator”. Department of Mechanical Engineering, King Mongkut’s University of Technology Thonburi, 91, Prachauti Road, Bangmod, Bangkok 10140, Thailand. Energy Conversion and Management 46 (2005) 85–100.
- 5.- M. A. Sattar, R. Saidur, and H. H. Masjuki. 2008. “Performance Investigation of Domestic Refrigerator Using Pure Hydrocarbons and Blends of Hydrocarbons as Refrigerants”. International Journal of Mechanical Systems Science and Engineering Volume 1 Number 1 2008 ISSN 1307-7473.
- 6.- Ian Maclaine-cross. 1998. “Replacement Refrigerants for Water Chillers”. The University of New South Wales.
- 7.- Ian Maclaine-cross. 1996. “Insurance risk for hydrocarbons refrigerant in car air conditioners cars”. The University of New South Wales.
- 8.- I. L. Maclaine-cross, E. Leonardi. 1995. “Performance and safety of LPG refrigerant”. The University of New South Wales.
- 9.- I. L. Maclaine-cross, E. Leonardi. 1995. “Why hydrocarbons save energy”. The University of New South Wales.
- 10.-Guidelines for the use of hydrocarbons refrigerants in static refrigeration and air conditioning systems. Air Conditioning and Refrigeration Industry Board. First Published. February 2001.
- 11.- Edwinn R. Stafford, Cathy L. Hartman, Yin Liang. 2003. “Forces driving environmental innovation diffusion in China: The case of Greenfreeze”. Bussines Horizons. Utah State University, Logan, Utah.
- 12.- Departamento de Protección Ambiental de Estados Unidos de Norteamérica. <http://epa.gov/Ozone/defns.html>. Actualizada al 12 de enero de 2008.
- 13.- Ministerio del trabajo y asuntos sociales de España. http://www.mtas.es/insht/ntp/ntp_379.htm, actualizado el 3 de febrero de 2008.
- 14.- Air Conditioning and Refrigeration Industry board (ACRIB), <http://www.acrib.org.uk/LXJNG542417>, al 22 de Febrero de 2008.
- 15.- Baolian Niu, Yufeng Zhang. 2006. “Experimental study of the refrigeration cycle performance for the R744/R290 mixtures”. International Journal of Refrigeration 30 (2007) 37-42. School of Environmental Science & Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, PR China.
- 16.- B. Tashtoush, M. Tahat, M.A. Shudeifat. 2001. “Experimental study of new refrigerant mixtures to replace R12 in domestic refrigerators”. Applied Thermal Engineering 22 (2002) 495–506. Department of Mechanical Engineering, P.O. Box 3030, JUST, Irbid, Jordan.

17.- N.P. Garland, M. Hadfield. 2004. "Environmental implications of hydrocarbon refrigerants applied to the hermetic compressor". *Materials and Design* 26 (2005) 578–586. Sustainable Product Engineering Research Centre, Bournemouth University, UK.

18.- Standard and Regulations Upon the Use of Hydrocarbons as Refrigerants. SHERPA. 2 de mayo de 2006.

19.- Jose Miguel Corberán, Jacobo Segurado. SHERHPA. 2004. "Characteristics of hydrocarbon refrigerants. Comparison with R22". Applied Thermodynamics Department Universidad Politécnica de Valencia.

20.- Pedro Hernández S, Pedro López M, María Alejandra Soto E. 2006. "Diseño de un equipo de refrigeración utilizando R-290 (Propano) como refrigerante natural". Miniproyecto de Ingeniería Química. Universidad Simón Bolívar.