

**Evaluación experimental del
Isobutano (R600a) como sustituto
del R134a en instalaciones de
compresión simple de vapor que
utilizan compresores herméticos**

Trabajo Final de Grado

Grado en Ingeniería Mecánica

Septiembre de 2015



Autor: Aitor Orihuela Gracia

Directores: Ramón Cabello López
Daniel Sánchez García-Vacas

Índice

1. Antecedentes	1
1.1. Cambio Climático.	2
1.2. Efecto Invernadero.	2
1.3. Destrucción de la Capa de Ozono.	5
2. Resumen y objetivo	6
3. Memoria	7
3.1. Introducción	7
3.1.1. Evolución de la refrigeración doméstica	7
3.1.2. Principios de refrigeración.....	9
3.1.3. Ciclo frigorífico.....	10
3.1.4. Propiedades de los refrigerantes	12
3.1.5. Tipos de refrigerantes	13
3.2. Comparativa de refrigerantes	14
3.2.1. FICHA TÉCNICA	14
3.2.2. FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD	18
3.2.3. Diagrama Presión (bar) – Entalpía (KJ/Kg).....	21
3.2.4. Diagrama Presión (bar) – Temperatura (°C).....	24
3.2.5. Diagrama Presión (bar) – Entropía (KJ/Kg-K).....	25
3.3. Legislación vigente	26
3.4. Análisis teórico	30
3.4.1. Análisis teórico sin IHX	32
3.4.2. Análisis teórico con IHX	34
3.4.3. Comparativa teórica del R600a vs. R134a con y sin IHX	36
3.5. Descripción de la instalación	38
3.5.1. Descripción de los principales elementos de la instalación	38
3.5.2. Descripción de los equipos secundarios para el aporte y disipación de calor	47
3.5.3. Descripción de los elementos de medida.....	49
3.5.4. Descripción del sistema de adquisición de datos de la instalación.....	54
3.5.5. Descripción de la aplicación SCADA	56
3.6. Metodología de ensayos empleada	61
3.6.1. Datos adquiridos.....	64

3.7. Comparativa experimental del R600a con vs. sin IHX	65
3.7.1. COP	65
3.7.2. Potencia frigorífica (Q_o)	67
3.7.3. Potencia consumida por el compresor (P_c).....	69
3.7.4. Flujo másico de refrigerante (m_{ref}).....	71
3.7.5. Salto entálpico en el evaporador (q_o).....	73
3.7.6. Salto entálpico en el compresor (w_c).....	75
3.7.7. Temperatura de descarga del compresor (T_{des})	77
3.8. Comparativa experimental del R600a vs. R134a con IHX	79
3.8.1. COP	79
3.8.2. Potencia frigorífica (Q_o)	81
3.8.3. Potencia consumida por el compresor (P_c)	83
3.8.4. Flujo másico de refrigerante (m_{ref}).....	85
3.8.5. Salto entálpico en el evaporador (q_o).....	87
3.8.6. Salto entálpico en el compresor (w_c).....	89
3.8.7. Temperatura de descarga del compresor (T_{des})	91
3.9. Parámetro TEWI	93
3.10. Conclusiones	96
3.10.1. Conclusiones de la comparativa experimental del R600a con vs. sin IHX.....	96
3.10.2. Conclusiones de la comparativa experimental del R600a vs. R134a con IHX	98
3.11. Bibliografía	100
4. Anexos	101
4.1. Ensayos	102
4.1.1. Ensayos del R134a con IHX.....	102
4.1.2. Ensayos del R134a sin IHX	103
4.1.3. Ensayos del R600a con IHX.....	104
4.1.4. Ensayos del R600a sin IHX	105
4.2. Comparativas	106
4.2.1. Comparativa experimental del R600a con vs. sin IHX.....	106
4.2.2. Comparativa experimental del R600a con vs. sin IHX (%).....	107
4.2.3. Comparativa experimental del R600a vs. R134a con IHX	108
4.2.4. Comparativa experimental del R600a vs. R134a con IHX (%)	109
4.3. Presupuesto	110

Ilustración 1. El futuro del mundo está en nuestras manos.	1
Ilustración 2. El antes y el después.	2
Ilustración 3. Balance de energías.	3
Ilustración 4. Focos que provocan el efecto invernadero.	3
Ilustración 5. Gases de efecto invernadero.	4
Ilustración 6. Total de emisiones GEI ajustados con PCG.	4
Ilustración 7. Destrucción de la capa de ozono.	5
Ilustración 8. Instalación donde se han realizado los ensayos.	6
Ilustración 9. Refrigeración doméstica.	9
Ilustración 10. Ciclo frigorífico.	10
Ilustración 11. Ciclo de Carnot.	11
Ilustración 12. Refrigerante R134a.	14
Ilustración 13. Refrigerante R600a.	14
Tabla 1. Propiedades físicas obtenidas.	15
Tabla 2. Propiedades de seguridad.	15
Tabla 3. Propiedades medioambientales.	15
Tabla 4. Lubricantes compatibles con el R600a.	16
Tabla 5. Compatibilidad con materiales del R134a.	17
Tabla 6. Identificación del producto.	18
Gráfica 1. Diagrama Presión – Entalpía.	23
Gráfica 2. Diagrama Presión – Temperatura.	24
Gráfica 3. Diagrama Presión – Entropía.	25
Tabla 7. Calendario de prohibiciones de comercialización del reglamento (UE) nº517/2014.	26
Ilustración 14. Análisis teórico.	30
Ilustración 15. Análisis teórico sin IHX.	32
Tabla 8. Resultados del análisis teórico sin IHX.	32
Gráfica 4. Análisis teórico sin IHX.	33
Ilustración 16. Análisis teórico con IHX.	34
Tabla 9. Resultados del análisis teórico con IHX.	34
Gráfica 5. Análisis teórico con IHX.	35
Tabla 10. Resultados de la comparativa teórica del R600a vs. R134a con y sin IHX.	36
Tabla 11. Comparativa COP vs. Eficiencia del IHX.	37
Gráfica 6. Comparativa COP vs. Eficiencia del IHX.	37
Ilustración 17. Instalación donde se han realizado los ensayos.	38
Ilustración 18. Esquema de la instalación.	38
Ilustración 19. Compresor hermético.	39
Tabla 12. Descripción del compresor.	39

Tabla 13. Características externas del compresor.	39
Tabla 14. Aplicación del compresor.	40
Tabla 15. Datos mecánicos del compresor.	40
Tabla 16. Datos eléctricos del compresor.	40
Ilustración 20. Ventilador.	40
Tabla 17. Características del ventilador.	40
Ilustración 21. Filtro de aceite.	41
Tabla 18. Características del filtro de aceite	41
Ilustración 22. Condensador	41
Tabla 19. Características del condensador.	41
Tabla 20. Características del condensador en la zona de refrigerante.	42
Tabla 21. Características del condensador en la zona de agua.	42
Ilustración 23. Intercambiador de calor intermedio (IHX).	42
Tabla 22. Características del IHX.	42
Ilustración 24. Depósito de expansión.	43
Ilustración 25. Válvula exp electron Carel E2V09BSF00.	43
Ilustración 26. Driver EVD Evolution + Display.	44
Ilustración 27. Evaporador.	44
Tabla 23. Características del evaporador.	44
Tabla 24. Características del evaporador en la zona de refrigerante.	45
Tabla 25. Características del evaporador en la zona de agua.	45
Ilustración 28. Válvula Swagelok.	45
Tabla 26. Características de las válvulas.	45
Ilustración 29. Visor.	46
Ilustración 30. Esquema de los elementos que enlazan la instalación principal con el S.A.T.	47
Ilustración 31. S.A.T en el lado de baja temperatura (evaporador).	48
Ilustración 32. S.A.T en el lado de alta temperatura (condensador)	48
Ilustración 33. Descripción de los elementos de medida.	49
Ilustración 34. Sondas en la zona de alta presión.	50
Tabla 27. Características de las sondas en la zona de alta presión.	50
Ilustración 35. Sondas en la zona de baja presión.	51
Tabla 28. Características de las sondas en la zona de baja presión.	51
Ilustración 36. Termopar.	52
Ilustración 37. Siemens MASS 6000 Compacto.	52
Ilustración 38. Sensor SITRANS FC300 DN4.	52
Ilustración 39. AXF Yokogawa.	53
Ilustración 40. Sistema de adquisición de datos.	54

Ilustración 41. Descripción del sistema de adquisición de datos.	54
Ilustración 42. Codificación de colores del sistema de adquisición de datos.	55
Ilustración 43. Descripción de la aplicación SCADA.	56
Ilustración 44. Primera pestaña (ESQUEMA).	57
Ilustración 45. Segunda pestaña (PRESIONES).	58
Ilustración 46. Opciones del gráfico.	58
Ilustración 47. Tercera pestaña (TEMPERATURAS).	59
Ilustración 48. Cuarta pestaña (POTENCIA Y CAUDAL).	60
Tabla 29. Metodología de ensayos empleada para el R134a.	61
Tabla 30. Metodología de ensayos empleada para el R600a.	61
Gráfica 7. Comparativa del COP vs. Tk del R600a con vs. sin IHX.	65
Gráfica 8. Comparativa del incremento de COP vs. Tk en % del R600a con vs. sin IHX.	66
Gráfica 9. Comparativa de la Qo vs. Tk del R600a con vs. sin IHX.	67
Gráfica 10. Comparativa del incremento de la Qo vs. Tk en % del R600a con vs. sin IHX.	68
Gráfica 11. Comparativa de la Pc vs. Tk del R600a con vs. sin IHX.	69
Gráfica 12. Comparativa del incremento de la Pc vs. Tk en % del R600a con vs. sin IHX.	70
Gráfica 13. Comparativa del mref vs. Tk del R600a con vs. sin IHX.	71
Gráfica 14. Comparativa del incremento de mref vs. Tk en % del R600a con vs. sin IHX.	72
Gráfica 15. Comparativa del qo vs. Tk del R600a con vs. sin IHX.	73
Gráfica 16. Comparativa del incremento de qo vs. Tk en % del R600a con vs. sin IHX.	74
Gráfica 17. Comparativa del Wc vs. Tk del R600a con vs. sin IHX.	75
Gráfica 18. Comparativa del incremento de Wc vs. Tk en % del R600a con vs. sin IHX.	76
Gráfica 19. Comparativa de la Tdes vs. Tk del R600a con vs. sin IHX.	77
Gráfica 20. Comparativa del incremento de Tdes vs. Tk en % del R600a con vs. sin IHX.	78
Gráfica 21. Comparativa del COP vs. Tk del R600a vs. R134a con IHX.	79
Gráfica 22. Comparativa del incremento de COP vs. Tk del R600a vs. R134a con IHX.	80
Gráfica 23. Comparativa de la Qo vs. Tk del R600a vs. R134a con IHX.	81
Gráfica 24. Comparativa del incremento de Qo vs. Tk del R600a vs. R134a.	82
Gráfica 25. Comparativa de la Pc vs. Tk del R600a vs R134a con IHX.	83
Gráfica 26. Comparativa del incremento de Pc vs. Tk del R600a vs. R134a con IHX.	84
Gráfica 27. Comparativa del mref vs. Tk del R600a vs. R134a con IHX.	85
Gráfica 28. Comparativa del incremento de mref vs. Tk del R600a vs. R134a con IHX.	86
Gráfica 29. Comparativa del qo vs. Tk del R600a vs. R134a con IHX.	87
Gráfica 30. Comparativa del incremento de qo vs. Tk del R600a vs. R134a con IHX.	88
Gráfica 31. Comparativa del Wc vs. Tk del R600a vs. R134a con IHX.	89
Gráfica 33. Comparativa de la Tdes vs. Tk del R600a vs. R134a con IHX.	91
Gráfica 34. Comparativa del incremento de la Tdes vs. Tk del R600a vs. R134a con IHX.	92

Ilustración 49. Parámetro TEWI.	93
Tabla 31. Cálculos del parámetro TEWI.	94
Gráfica 35. Comparativa del parámetro TEWI del R600a vs. R134a.	94
Gráfica 36. Comparativa de las toneladas de CO2 equivalente vs. Tasa de fugas del R600a vs R134a.	95
Gráfica 37. Comparativa de las toneladas de CO2 equivalente vs. Tasa de reciclaje del R600a vs. R134a.	95
Tabla 37. Comparativa experimental del R600a con vs. sin IHX (%).	96
Tabla 39. Comparativa experimental del R600a vs. R134a con IHX (%).	98
Tabla 32. Ensayos del R134a con IHX.	102
Tabla 33. Ensayos del R134a sin IHX.	103
Tabla 34. Ensayos del R600a con IHX.	104
Tabla 35. Ensayos del R600a sin IHX.	105
Tabla 36. Comparativa experimental del R600a con vs. sin IHX.	106
Tabla 37. Comparativa experimental del R600a con vs. sin IHX (%).	107
Tabla 38. Comparativa experimental del R600a vs. R134a con IHX.	108
Tabla 39. Comparativa experimental del R600a vs. R134a con IHX (%).	109
Tabla 40. Presupuesto.	110

Nomenclatura

Símbolos	Nombre	Unidades
CFCs	Clorofluorocarbonos	-
COP	Eficiencia energética	-
E an	Consumo anual de energía eléctrica	KWh
GEI	Gases de Efecto Invernadero	-
GWP ó PCG	Potencial de Calentamiento Global	-
h	Entalpía	KJ/Kg
HCFCs	Hidroclorofluorocarbonos	-
HFCs	Hidrofluorocarbonos	-
IHX	Intercambiador de calor intermedio	-
L	Tasa de fugas	%
LIF	Límite Inferior de Inflamabilidad	%
m	Carga de refrigerante	Kg
m ref	Caudal másico de refrigerante	Kg/s
n	Vida útil de la instalación	Años
NBP	Normal Boiling Point	°C
ODP	Ozone Depletion Potential	-
P	Presión	bar
q	Quality ó salto entálpico	-
Q	Caudal de agua	m3/s
s	Entropía	KJ/Kg·K
SAT	Sistema de Apoyo Térmico	-
T	Temperatura	°C
TEWI	Total Equivalent Warming Impact	Toneladas de CO2 equivalente

Símbolos Griegos	Nombre	Unidades
ϵ	Eficiencia	%
α	Tasa de reciclaje / recuperación	%
β	Factor de emisiones de CO2 indirecto	Kg CO2 / KWh
Δ	Incremento	-
η	Rendimiento	%
λ	Salto entálpico desde vapor saturado a líquido saturado	KJ/Kg
v	Volumen específico	Kg/m3

Subíndices	Nombre
amb	Ambiente
asp	Aspiración
c	Compresor
col	Colector
des	Descarga
evap	Evaporador
i	Entrada
k	Condensador
o	Salida

1. Antecedentes.

El ser humano lleva miles de años desarrollando, inventando y construyendo centenares de proyectos tecnológicos, desde pequeñas herramientas de mano hasta grandes rascacielos o puentes. Uno de los mayores saltos tecnológicos se produjo con la primera Revolución Industrial. En ese momento apareció la máquina de vapor, revolucionando así el mundo del transporte. También se descubrió la electricidad y los motores de combustión, es decir, se pasó de usar el trabajo humano a utilizar las energías existentes en el planeta para producir dicho trabajo. Además, se empezaron a desarrollar los primeros sistemas de producción de frío o también llamados máquinas de refrigeración y con ellos, los fluidos frigoríferos.

Todos estos descubrimientos están dejando huella en el planeta y se están produciendo cambios negativos como son el cambio climático, el efecto invernadero y la destrucción de la capa de ozono.

Todos estos problemas están ocurriendo por culpa del excesivo uso de materias primas que las nuevas generaciones de personas están demandando al planeta.

Las principales causas son la contaminación producida por los motores de combustión, la producción de energía eléctrica no renovable o los propios fluidos frigoríferos, ya sea en el sector industrial o doméstico.

Por ello, el ser humano debe preguntarse o imaginarse cómo será nuestro planeta dentro de pocos años si no se actúa ante este grave problema. Si el ser humano no cuida el planeta Tierra, junto con toda su vegetación y seres vivos, el mundo puede acortar su larga vida.

Por esta razón, uno de los cambios que se debe realizar es usar fluidos frigoríferos menos nocivos y perjudiciales con el medio ambiente, y sustituirlos por otros más respetuosos con nuestro planeta Tierra.



Ilustración 1. El futuro del mundo está en nuestras manos.

1.1. Cambio Climático.

Se llama cambio climático a la modificación del clima con respecto al historial climático a una escala global o regional. Tales cambios se producen a muy diversas escalas de tiempo y sobre todos los parámetros meteorológicos: temperatura, presión atmosférica, precipitaciones, nubosidad, etc. En teoría, son debidos tanto a causas naturales como antropogénicas.

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático usa el término cambio climático sólo para referirse al cambio por causas humanas, es decir, antropogénicas:

Por cambio climático se entiende un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos comparables.



Ilustración 2. El antes y el después.

1.2. Efecto Invernadero.

El efecto invernadero es un proceso en el que la radiación térmica emitida por la superficie planetaria es absorbida por los gases de efecto invernadero (GEI) atmosféricos y es reirradiada en todas direcciones. Ya que parte de esta reirradiación es devuelta hacia la superficie y la atmósfera interior. Esto provoca un incremento de la temperatura superficial media respecto a la temperatura que habría en ausencia de los GEI.

La radiación solar en frecuencias de la luz visible pasa en su mayor parte a través de la atmósfera para calentar la superficie planetaria y luego esta emite esta energía en frecuencias menores de radiación térmica infrarroja. Esta última es absorbida por los GEI, los que a su vez reirradian mucha de esta energía a la superficie y atmósfera inferior.

El siguiente esquema del efecto invernadero muestra los flujos de energía entre el espacio, la atmósfera y la superficie de la tierra. En esta gráfica, la radiación absorbida es igual a la emitida, por lo que la Tierra no se calienta ni se enfría. La habilidad de la atmósfera para capturar y reciclar la energía emitida a la superficie terrestre es el fenómeno que caracteriza al efecto invernadero.

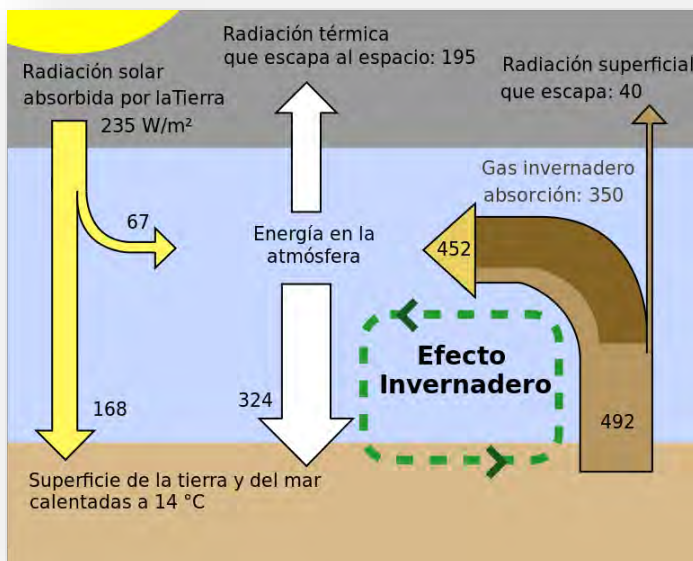


Ilustración 3. Balance de energías.

El efecto invernadero natural de la Tierra hace posible la vida como la conocemos. Sin embargo, las actividades humanas, principalmente la quema de combustibles fósiles y la tala de bosques, han intensificado el fenómeno natural, causando un calentamiento global.



Ilustración 4. Focos que provocan el efecto invernadero

Los denominados gases de efecto invernadero o gases invernadero (GEI), responsables del efecto descrito, son:

- Vapor de agua (H_2O)
- Dióxido de carbono (CO_2)
- Metano (CH_4)
- Óxido de nitrógeno (N_2O)
- Ozono (O_3)
- Gases Fluorados (CFC, HCFC, HFC, SF6 y PFC)

Si bien todos ellos (salvo los CFCs) son naturales, en tanto que ya existían en la atmósfera antes de la aparición del hombre, desde la Revolución Industrial y debido principalmente al uso intensivo de los combustibles fósiles en las actividades industriales y el transporte.

GASES DE EFECTO INVERNADERO

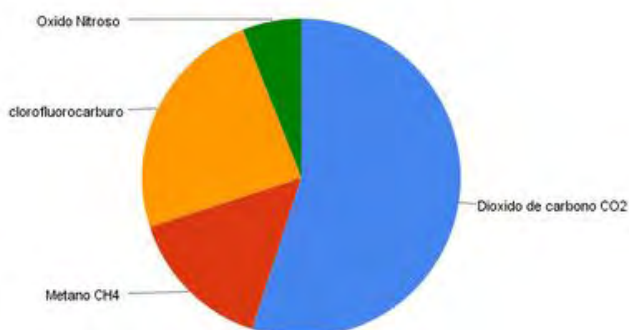


Ilustración 5. Gases de efecto invernadero.

El Potencial de Calentamiento Global (PCG) o en inglés Global Warming Potential (GWP) define el efecto de calentamiento integrado a lo largo del tiempo que produce hoy una liberación instantánea de 1 Kg de un gas de efecto invernadero, en comparativa con el causado por el CO_2 . De esta forma, se pueden tener en cuenta los efectos radioactivos de cada gas, así como sus diferentes periodos de permanencia en la atmósfera.

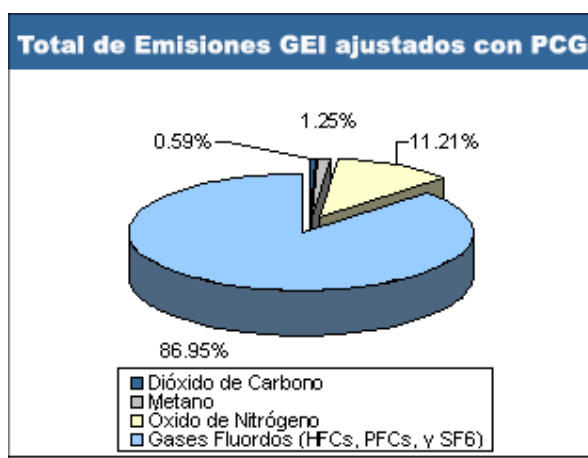


Ilustración 6. Total de emisiones GEI ajustados con PCG.

1.3. Destrucción de la Capa de Ozono.

El ozono (O_3), ubicado en la Estratosfera entre 15 y 30 km de altura, se acumula en la atmósfera en grandes cantidades, y se convierte en un escudo que nos protege de la radiación ultravioleta que proviene del sol, haciendo posible la vida en la Tierra.

El gas Ozono está en un continuo proceso de formación y destrucción, ya que al poseer tres átomos de Oxígeno que se liberan a la atmósfera, siempre uno de ellos se une a una molécula de Oxígeno y forma nuevamente Ozono. Este último, después de absorber los rayos UV se divide formando una molécula de oxígeno y liberando un átomo de oxígeno. Este es un proceso cíclico que se repite constantemente.

Durante los últimos años, la capa de ozono se ha debilitado formando un verdadero agujero, que en algunos sectores ha producido disminuciones de hasta el 60 % en la cantidad de ozono estratosférico. Este desgaste se debe al uso de un componente químico producido por el hombre, los clorofluorocarburos (CFCs) de productos, como los aerosoles, disolventes, propelentes y refrigerantes.



Ilustración 7. Destrucción de la capa de ozono.

La acción de estos gases en la estratosfera libera átomos de cloro a través de la radiación UV sobre sus enlaces moleculares. Cada átomo de cloro destruye miles de moléculas de Ozono, transformándolas en moléculas de dióxigeno. Otros compuestos que afectan la capa de ozono por contener cloro son el metilcloroformo (solvente), el tetracloruro de carbono (un químico industrial) y sustancias que contengan bromo (Br), como los halones utilizados para extinguir el fuego.

El nivel excesivo de la radiación UV (especialmente la A y la B) que llegue a la superficie de la Tierra puede perjudicar la salud de las personas, en patologías como: aparición de cáncer de piel, lesiones en los ojos que producen cataratas, la deformación del cristalino o la presbicia, y el deterioro del sistema inmunológico, influyendo de forma negativa sobre la molécula de ADN donde se ven afectadas las defensas del cuerpo.

A nivel de fauna, el aumento de rayos UV daña los ecosistemas acuáticos. Se ha visto que el daño en algunas zonas de aguas claras ha alcanzado hasta 20 metros de profundidad. Como consecuencia, se ha perdido parte de fitoplancton (base de la cadena alimenticia marina).

2. Resumen y objetivo.

El Reglamento Europeo EU-nº 517/2014 sobre los gases fluorados de efecto invernadero, establece un calendario de reducción en la utilización de refrigerantes de la familia HC con elevado potencial de calentamiento global. Así, para 2030 se reducirá en un 79% la disponibilidad de estas sustancias en el mercado.

Dentro de este contexto, se plantea en este proyecto estudiar de forma experimental el comportamiento de una instalación de compresión de baja potencia que utiliza compresor hermético ante el cambio directo del refrigerante HFC134a, con un PCA de 1430, por el refrigerante natural R600a, con un PCA de 3.

Para llevar a cabo el estudio se realizará una primera campaña de ensayos con el R600a en los que se variará la temperatura de evaporación en el rango -10°C a 10°C , manteniendo constante la presión de condensación. Cada nivel de evaporación se ensayará con tres temperaturas de condensación: 25°C , 35°C y 45°C .

Todos los ensayos se realizarán para dos situaciones diferentes, con y sin intercambiador de subenfriamiento/recalentamiento.

Para realizar los ensayos se utilizará una instalación existente en el laboratorio, que se encuentra operativa.

Una vez obtenidos los datos experimentales se procederá a analizarlos y compararlos con los equivalentes obtenidos con el R134a.

En el análisis se valorará el comportamiento de las principales variables energéticas de la instalación, incluyendo el parámetro TEWI.

Finalmente se redactarán las conclusiones del trabajo.



Ilustración 8. Instalación donde se han realizado los ensayos.

3. Memoria

3.1. Introducción

3.1.1. Evolución de la refrigeración doméstica

Una de las necesidades básicas del ser humano ha sido y es la de conservar los alimentos a temperaturas bajas, para reducir la producción de bacterias en estos. Por otro lado, cuando en verano se alcanzan elevadas temperaturas en locales cerrados es necesaria la refrigeración de dichos locales para un confort adecuado de las personas.

La historia de la refrigeración comienza con la utilización de agentes naturales como son el agua, la nieve y el hielo.

En nuestro entorno es conocido el uso de los pozos de hielo de Cataluña, Aragón, Castilla y Navarra.

Los pozos de hielo tenían unas dimensiones generalmente grandes, con un diámetro de entre 4 y 6 metros y con una profundidad de entre 6 y 9 metros. Todo este espacio se rellenaba con sucesivas capas de hielo que se separaban con paja para poder cortarlo después.

- En **1775**, un médico escocés llamado **William Cullen**, encontró *el primer método para la fabricación mecánica de hielo*, pero su procedimiento sólo permitió elaborar una pequeña cantidad de hielo.
- En **1834**, un norteamericano llamado **Jacob Perkins**, patentó la *primera máquina de hacer hielo*. La máquina de Perkins fue la predecesora de la actual refrigeración por compresión de vapor.
- En **1834**, un francés llamado **Jean Peltier**, descubre que *el paso de una corriente eléctrica a través de un circuito integrado por dos conductores diferentes, produce un efecto de enfriamiento*. Junto con los trabajos de Seebeck constituyeron la base de la refrigeración termodinámica.
- En **1844**, un médico llamado **John Gorrie**, desarrolló una *máquina que producía frío mediante un ciclo de aire y el fluido no sufría cambio de fase*. Fue la base de las máquinas de refrigeración de ciclo de aire.
- En **1852**, un británico llamado **Lord Kelvin**, propuso la *utilización de máquinas de producción de frío como sistema de calefacción*, introduciendo el modo de funcionamiento como *bomba de calor*.
- En **1859**, un francés llamado **Ferdinand Carré**, inventó la *primera máquina de absorción* y además, fue el *primero en utilizar el amoníaco como fluido frigorígeno*.
- En **1890**, el **hielo natural** fue la *aplicación más utilizada en el sector de la refrigeración doméstica*.

- En **1913**, **Fred Wolf padre** impulsa el desarrollo de la refrigeración con amoníaco (NH₃). Por otro lado, **Fred Wolf hijo** saca al mercado el DOMELDE (Domestic Electric Refrigerator), un equipo doméstico con anhídrido sulfuroso como refrigerante (elevados índices de toxicidad e inflamabilidad).
- En **1930**, **Thomas Midgley** desarrolló el R12. El R12 es un fluido frigorígeno que pertenece a la familia de los Clorofluorocarbonos (CFCs). En esa época, los CFCs se consideraban sustancias inofensivas y extremadamente estables.
- **Más tarde** llegarían los fluidos hidroclorofluorocarbonos (HCFC) y los hidrofluorocarbonos (HFC).
- En **1974**, **Rowland y Molina** presentaron una hipótesis según la cual los CFCs destruyen la capa de ozono. Se estima que sólo un átomo liberado de CFC puede dar origen a una reacción en cadena que puede destruir 100.000 moléculas de ozono.
- En **1989** entró en vigor el Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono, con el fin de intentar reducir, escalonadamente, la producción de CFCs y otras sustancias químicas que destruyen la capa de ozono.
- Desde **1994**, la Unión Europea exige la clasificación energética de los electrodomésticos. Se deben etiquetar mediante siete letras en una escala que va, por orden alfabético, desde la A hasta la G. Siendo los más eficientes los cercanos a la letra A.
- En **2005** entró en vigor el Protocolo de Kyoto relativo a las sustancias que favorecen el efecto invernadero en el planeta Tierra.
- En **2014** entró en vigor el Reglamento Europeo EU-nº 517/2014 sobre los gases fluorados de efecto invernadero. Este reglamento establece un calendario de reducción en la utilización de refrigerantes de la familia HC con elevado potencial de calentamiento global.

3.1.2. Principios de refrigeración

Según el Reglamento de Seguridad para Plantas e Instalaciones Frigoríficas (RSPIF), define refrigerante como el fluido utilizado en la transmisión de calor que, en un sistema frigorífico absorbe calor a bajas temperaturas y presiones, cediéndolo a temperaturas y presiones más altas. Generalmente, este proceso tiene lugar con cambio de estado del fluido.

Para comprender el ciclo de la refrigeración, hay que partir de los principios físicos que gobiernan la producción de la refrigeración. Éstos pueden resumirse en seis principios:

1. Para poder producir frío en un recinto, se debe extraer calor desde el interior hacia el exterior.
2. El calor siempre se transmite desde un cuerpo a mayor temperatura a otro de menor temperatura.
3. Todos los líquidos, cuando entran en ebullición, absorben calor latente del ambiente que los rodea pero sin variar su temperatura.
4. La temperatura de saturación o punto de ebullición, para unas mismas condiciones de presión, es la misma que la temperatura de condensación.
5. El punto de ebullición de un líquido depende de la presión que se ejerza sobre dicho líquido. Cabe destacar que a mayor presión, mayor será el punto de ebullición.
6. Si el vapor saturado se condensa, cede calor latente al medio que le rodea.

En un ciclo de compresión-vapor, el refrigerante es el fluido de trabajo del ciclo el cuál, alternativamente, se vaporiza y se condensa, absorbiendo y cediendo calor respectivamente. Para que un refrigerante sea apropiado, debe poseer ciertas propiedades físicas, químicas y termodinámicas, que lo hagan seguro y estable durante su funcionamiento.

No existe un refrigerante ideal, ni que pueda ser universalmente adaptable a todas las aplicaciones. Por lo tanto, las propiedades del refrigerante deben aproximarse a las condiciones ideales, pero cumpliendo las necesidades de cada tipo de aplicación.



Ilustración 9. Refrigeración doméstica.

3.1.3. Ciclo frigorífico

El ciclo frigorífico es un ciclo termodinámico donde producen una serie de procesos termodinámicos. Cuando el ciclo vuelve a su estado inicial, la variación de las magnitudes propias del sistema termodinámico es nula.

Por otro lado, otras variables como la transferencia de calor o el trabajo no son cero, ya que no dependen del sistema termodinámico, sino de la transferencia entre el sistema y el entorno.

El ciclo termodinámico se rige por la primera ley de la termodinámica o ley de conservación de la energía. Esta ley dice que la cantidad de energía total de un sistema físico aislado permanece invariable con el tiempo.

El ciclo de Carnot inverso o ciclo de compresión reversible se produce cuando un equipo trabaja absorbiendo una cantidad de calor de un foco frío y lo cede a un foco de mayor temperatura o foco caliente.

Como la transferencia de calor se produce de manera inversa al principio que enuncia la segunda ley de la termodinámica, el calor pasa del foco frío al foco caliente, por lo tanto se debe aportar trabajo mecánico para que se produzca dicha transferencia.

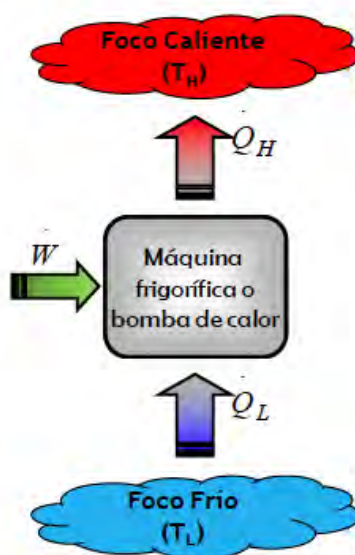


Ilustración 10. Ciclo frigorífico.

Si el objetivo es que el sistema extraiga calor del foco frío se denomina máquina frigorífica, por el contrario, si el objetivo es ceder calor al foco frío se denomina bomba de calor.

El ciclo de Carnot consta de cuatro etapas diferentes: dos procesos isotérmicos y dos adiabáticos.

- **Primera etapa: 1 – 2.** Compresión ideal isoentrópica. Se absorbe trabajo exterior para aumentar la presión del fluido. En consecuencia también se aumenta la temperatura.
- **Segunda etapa: 2 – 3.** Cesión de calor y compresión isoterma. El fluido cede calor al foco caliente mientras la presión se mantiene constante.
- **Tercera etapa: 3 – 4.** Expansión ideal isoentrópica. El fluido se expande, disminuyendo la presión y aumentando el volumen.
- **Cuarta etapa: 4 – 1.** Absorción de calor y expansión isoterma. El fluido absorbe calor del foco frío aumentando su entalpía, mientras la presión se mantiene constante. Esta etapa devuelve al fluido a sus características iniciales.

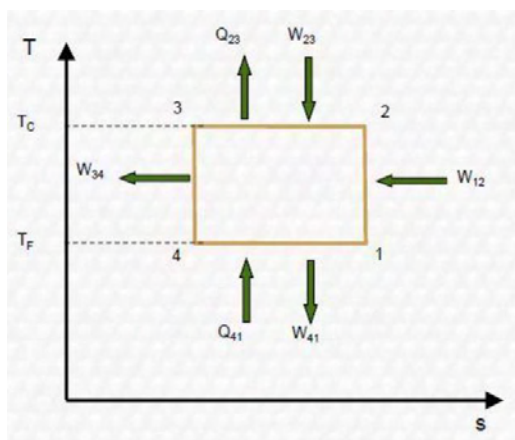


Ilustración 11. Ciclo de Carnot.

Balances energéticos durante el ciclo.

$$\Delta E = \dot{Q}_{total} - \dot{W}_{total} = 0$$

Aplicando el criterio termodinámico de signos en los flujos de energía:

$$\dot{Q}_{frio} - \dot{Q}_{caliente} = -\dot{W}$$

Como consecuencia:

$$\dot{Q}_{frio} < \dot{Q}_{caliente}$$

La energía o potencia térmica absorbida del foco frío siempre será inferior a la cedida en el foco caliente.

3.1.4. Propiedades de los refrigerantes

- **Baja temperatura de ebullición:** debe tener un punto de ebullición por debajo de la temperatura ambiente, a presión atmosférica.
- **Alto calor latente de evaporización:** cuanto mayor sea el calor latente de vaporización, mayor será el calor absorbido por Kg de refrigerante en circulación.
- **Seguro:** no inflamable, no tóxico y no explosivo.
- **Químicamente estable:** debe permitir su cambio de estado infinitas veces.
- **No corrosivo:** debe asegurarse que el refrigerante a utilizar no afecte al resto de componentes de la instalación.
- **Inocuo para el aceite lubricante del compresor:** la acción del refrigerante en los aceites lubricantes no debe alterar la acción de lubricación.
- **Miscible con el aceite lubricante del compresor:** el aceite debe ser miscible con el refrigerante, para que el aceite que migra del cárter pueda circular fácilmente por la instalación.
- **Bajo punto de congelación:** la temperatura de congelación debe estar muy por debajo de cualquier temperatura a la cuál pueda operar el evaporador.
- **Alta temperatura crítica:** la mayoría de los refrigerantes poseen temperaturas críticas superiores a 93 °C.
- **Moderado volumen específico de vapor:** esto permite reducir el tamaño del compresor a utilizar, ya que con menor desplazamiento volumétrico, se puede mover mayor caudal másico.
- **GWP:** debe poseer un índice bajo de GWP (Global Warming Potencial).
- **ODP:** debe poseer un índice nulo de ODP (Ozone Depletion Potential).

3.1.5. Tipos de refrigerantes

➤ GRUPO 1

Son refrigerantes no combustibles y tienen una toxicidad casi nula. A este grupo pertenecen los denominados FREONES, marca comercial que por extensión se denominan los compuestos halogenados formados por:

- **Clorofluorocarbonos (CFCs):** R11, R12 y R502
- **Hidroclorofluorocarbonos (HCFCs):** R22
- **Hidrofluorocarbonos (HFCs):** R134a y R404a

La molécula de cloro es la que reacciona con la molécula de ozono (O₃), descomponiéndola en oxígeno (O₂). El primer paso para eliminar el cloro de los refrigerantes fue la invención de los HFCs como el R134a.

➤ GRUPO 2

Son refrigerantes que son tóxicos, corrosivos y su mezcla con el aire puede generar una nube de aire combustible o explosivo a un porcentaje igual o superior a un 3,5 % o más en volumen.

A este grupo pertenecen el **cloruro de metilo, anhídrido sulfuroso y amoníaco (R717)**.

➤ GRUPO 3

Son refrigerantes cuya mezcla con aire puede generar una nube de aire combustible o explosiva a un porcentaje inferior a un 3,5 % o más en volumen.

A este grupo pertenecen el **propano (R290), butano (R600) e isobutano (R600a)**.

➤ MEZCLA DE REFRIGERANTES

- **Refrigerante azeótropo:** son todos aquellos refrigerantes que empiezan por cuatrocientos, como por ejemplo el R404A. Están constituidos por una mezcla de dos o más refrigerantes con puntos de ebullición diferentes, en una proporción tal que cambian de fase a temperatura constante, es decir, como si fuesen un único refrigerante.
- **Refrigerante zeótropo:** son todos aquellos refrigerantes que empiezan por quinientos, como por ejemplo el R507A. Están constituidos por una mezcla de dos o más refrigerantes que poseen puntos de ebullición diferentes y cuando cambian de fase, la temperatura varía tanto en la ebullición como en la condensación.

3.2. Comparativa de refrigerantes

3.2.1. FICHA TÉCNICA

3.2.1.1. Características y aplicaciones

- Refrigerante R134a



Ilustración 12. Refrigerante R134a.

El gas refrigerante R134a es un HFC que sustituye al R12 en instalaciones nuevas. Como todos los refrigerantes HFC no daña la capa de ozono. Tiene una gran estabilidad térmica y química, una baja toxicidad y no es inflamable, además de tener una excelente compatibilidad con la mayoría de materiales.

- Refrigerante R600a



Ilustración 13. Refrigerante R600a.

El isobutano o R600a, es un hidrocarburo que se utiliza en algunos equipos de refrigeración, como neveras domésticas o pequeños aparatos de frío comercial. El R600a tiene una capacidad volumétrica inferior en un 50 % al R134a, por lo que no se puede considerar un sustituto de éstos.

Es muy importante cuando se trabaja con refrigerantes del tipo hidrocarburos que estos sean de alta pureza, ya que cualquier proporción con otras impurezas, como sulfuros, agua, etc, pueden contribuir a la degradación de los aceites lubricantes de la instalación, rotura de compresores, etc. También ocurre a veces, que si el hidrocarburo no es de alta pureza, pueden ir mezclados con él otros hidrocarburos, pudiendo variar drásticamente las propiedades físicas y termodinámicas del hidrocarburo original.

El isobutano que se utiliza en aplicaciones de refrigeración, no está olorizado como los de uso doméstico (el hidrocarburo doméstico se oloriza para que sea rápidamente detectable en el caso de fuga), no siendo fácilmente detectable en caso de fugas.

3.2.1.2. Propiedades físicas

Fluido	R134a	R600a
Nombre químico	1,1,1,2 - Tetrafluoroetano	Isobutano
Fórmula química	C ₂ H ₂ F ₄	(CH ₃) ₃
Masa molecular (g/mol)	102	58,1
Temperatura crítica (°C)	101,1	134,7
Presión crítica (bar)	40,6	36,3
NBP = Punto normal de ebullición (°C)	-26,4	-12,1
Volumen específico (m ³ /Kg)	0,1926	0,3582
Vapor saturado para NBP		
λ (KJ/Kg) para NBP	217,2	365,4

Tabla 1. Propiedades físicas obtenidas.

3.2.1.3. Propiedades de seguridad

Fluido	R134a	R600a
OEL (PPMv)	1000	800
LIF (% en volumen)	No inflamable	1,85
Grupo de seguridad ASHRAE 34	A1	A3

Tabla 2. Propiedades de seguridad.

3.2.1.4. Propiedades medioambientales

Fluido	R134a	R600a
ODP	0	0
GWP	1430	3
Tiempo de vida atmosférico (años)	14	0,019

Tabla 3. Propiedades medioambientales.

3.2.1.5. Aceites compatibles

- **Refrigerante R134a**

No es miscible con los aceites tradicionales del R12 (mineral y alquilbencénico); en cambio su miscibilidad con los aceites poliolésteres (POE) es completa, por lo que debe de utilizarse siempre con este tipo de aceites.

- **Refrigerante R600a**

El isobutano, lo mismo que el resto de refrigerantes del tipo hidrocarburos, tienen en general muy buena miscibilidad con cualquier tipo de lubricante. Debido a la buena solubilidad que existe entre los aceites minerales y estos refrigerantes, hay sistemas donde puede ser necesario utilizar aceites de mayor viscosidad para compensar ese exceso de solubilidad.

Los lubricantes que contienen silicona o silicatos no son recomendables. En cualquier caso se recomienda seguir las instrucciones, o se utilicen los lubricantes recomendados por el fabricante del compresor.

Lubricante	Compatibilidad
Mineral	Compatible con refrigerantes de tipo hidrocarburos. Presentan excesiva solubilidad en aplicaciones de alta temperatura. Se puede compensar esta situación utilizando aceites minerales de mayor viscosidad.
Alquilbencénicos (AB)	Totalmente compatible
Semisintéticos (M + AB)	La mezcla de aceite mineral y alquilbencénico es la más apropiada para trabajar con este tipo de refrigerantes.
Polioléster (POE)	Demasiada solubilidad con los hidrocarburos. Puede requerir utilizar POE de mayores viscosidades.
Polialquilenglicoles (PAG)	Solubles, dependiendo de las condiciones de trabajo.
Polialfaolefinas (PAO)	Solubles, recomendado para aplicaciones de baja temperatura.

Tabla 4. Lubricantes compatibles con el R600a.

3.2.1.6. Compatibilidad con materiales

- Refrigerante R134a

ELASTÓMEROS	C	PC	NC	PLASTÓMEROS	C	PC	NC
Goma butílica	x			Propileno	x		
Neopreno	x			PVC	x		
Buna N	x			Polietileno	x		
Buna S		x		Nylon	x		
Goma fluorada			x	Poliestireno		x	
Goma natural	x			PTFE	x		
Goma siliconada		x		Poliacetileno	x		
Goma EPDM	x			Resina epoxi	x		
Polisulfúrica	x			ABS		x	

Tabla 5. Compatibilidad con materiales del R134a.

Dónde: C = Compatible; PC = Poco compatible; NC = No Compatible

- Refrigerante R600a

Casi todos los elastómeros y plastómeros que se pueden encontrar en los sistemas de refrigeración son compatibles con hidrocarburos. Los materiales que se deben evitar, ya que son incompatibles con ellos son la goma EPDM, gomas naturales y siliconas.

3.2.1.7. Toxicidad y almacenamiento

- Refrigerante R134a

El R134a es una sustancia con muy poca toxicidad. El índice por inhalación LCL0 es de 4 horas en ratas es inferior a 500.000 ppm y el NOEL en relación a problemas cardíacos es aproximadamente 75.000 ppm. En exposiciones durante 104 semanas a una concentración de 10.000 ppm no se ha observado efecto alguno. Los envases de R134a deben ser almacenados en lugares frescos y ventilados, lejos de focos de calor. Los vapores de R134a son más pesados que el aire y suelen acumularse cerca del suelo.

- Refrigerante R600a

El refrigerante R600a puede considerarse no tóxico.

3.2.1.8. Inflamabilidad

- Refrigerante R600a

Temperatura de autoignición (°C) = 460

Límites de inflamabilidad (Inferior. vol % = 1,85; Superior. Vol % = 8,5)

3.2.2. FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

3.2.2.1. Identificación del producto

Nombre comercial	R134a	Isobutano (R600a)
Tipo de producto y uso	Gas refrigerante	Gas líquido, gas refrigerante
Número CAS	811 – 97 – 2	75 – 28 – 5
Número EC	212 – 377 – 0	200 – 857 – 2
Nº registro REACH	01 – 2119459374 – 33 - 0000	-

Tabla 6. Identificación del producto.

3.2.2.2. Identificación de los peligros

❖ Clasificación de la sustancia

Criterios de las Directivas 67/548/CE, 99/45/CE

➤ Propiedades / símbolos:

R134a: Ninguna

R600a: F+ y R12 (Extremadamente inflamable)

➤ Criterios Reglamentación CE 1272/2008 (Clasificación, Etiquetado y Empacado):

R134a:  Atención, Liquef. Gas, Contiene gas a presión

R600a:  Atención, Liquef. Gas, Contiene gas a presión

 2.2/1 Flam. Gas 1 H220

❖ Elementos de la etiqueta

• Refrigerante R134a

H280 Contiene gas a presión; peligro de explosión en caso de calentamiento

P410+P403 Proteger de la luz del sol. Almacenar en un lugar bien ventilado.

El preparado no se considera peligroso, de acuerdo con la Directiva 1999/45/CE y sucesivas modificaciones.

El contacto directo con el líquido puede provocar congelaciones. El producto contiene gases fluorados de efecto invernadero cubierto por el protocolo de Kyoto sobre el cambio climático.

- **Refrigerante R600a**

F+ Extremadamente inflamable.

R12 Extremadamente inflamable.

S16 Consérvese alejado de toda llama o fuente de chispas. No fumar.

S29 No tirar los residuos por el desagüe.

S33 Evítense la acumulación de cargas electrostáticas.

S43 En caso de incendio, utilizar agua o espuma.

S9 Consérvese el recipiente en lugar bien ventilado.

El contacto directo con el líquido puede provocar congelaciones.

❖ **Primeros auxilios**

- **Refrigerante R134a**

En caso de contacto con la piel: descongelar las zonas afectadas con agua. Quitar la ropa contaminada. La ropa puede adherirse a la piel en el caso de quemaduras por congelación. En caso de contacto con la piel, lávese inmediata y abundantemente con agua caliente. Si se produce irritación o bien se forman ampollas, acudir al médico.

En caso de contacto con los ojos: Irrigar inmediatamente con solución lavaojos o con agua clara, manteniendo los párpados separados, durante 10 minutos como mínimo. Acudir al médico inmediatamente.

En caso de ingestión: ruta de exposición improbable. No provocar vómito. En el supuesto que el paciente esté consciente, lavar la boca con agua y dar de beber 200 – 300 ml de agua. Acudir al médico inmediatamente.

En caso de inhalación: apartar al paciente del lugar de exposición; sacarlo al aire libre, mantenerlo abrigado y en reposo. Administrar oxígeno si es necesario. Aplicar la respiración artificial si fuera necesario. En la eventualidad de paro cardíaco, aplicar masaje cardíaco externo. Acudir al médico inmediatamente.

- **Refrigerante R600a**

En caso de contacto con la piel: lavar la parte congelada con agua abundante. No quitar la ropa. Cubrir la herida con vendaje esterilizado.

En caso de contacto con los ojos: lavar inmediatamente con agua corriente, con los párpados abiertos, por lo menos durante 10 minutos; luego proteja los ojos con gasa estéril o un pañuelo limpio y seco. Consulte a un médico.

En caso de ingestión: la ingestión no está considerada como una vía potencial de exposición.

En caso de inhalación: salir al aire libre. Si la respiración es dificultosa o se detiene, proporcione respiración asistida. Se puede suministrar oxígeno suplementario. Si se detiene el corazón, el personal capacitado debe comenzar de inmediato la resucitación cardio – pulmonar.

❖ Medidas de lucha contra incendios

• Refrigerante R134a

El HFC R134a no es inflamable en el aire en condiciones normales de temperatura y presión. Ciertas mezclas de HFC R134a y aire bajo presión pueden resultar inflamables. Deben evitarse las mezclas de HFC R134a y aire bajo presión. Ciertas mezclas de HFC y cloro pueden ser inflamables o reactivas en determinadas condiciones. La descomposición térmica desprende vapores muy tóxicos y corrosivos. Por ejemplo, en el Fluoruro de hidrógeno, su envase puede explotar si se sobrecalienta.

Medios de extinción: agua y dióxido de carbono.

Peligros específicos derivados de la sustancia o la mezcla: no inhalar los gases producidos por la explosión.

Recomendaciones para el personal de lucha contra incendios: utilizar equipos respiratorios apropiados. Recoger por separado el agua contaminada utilizada para extinguir el incendio. No descargarla en la red de alcantarillado. Si es posible, desde el punto de vista de la seguridad, retirar de inmediato del área los contenedores no dañados.

• Refrigerante R600a

Medios de extinción: en caso de incendio utilizar agua pulverizada, espuma o dióxido de carbono. Los medios de extinción que no se deben utilizar por motivos de seguridad: no usar agua a chorro.

Peligros específicos derivados de la sustancia o la mezcla: no inhalar los gases producidos por la explosión y por la combustión.

Recomendaciones para el personal de lucha contra incendios: utilizar equipos respiratorios apropiados. Recoger por separado el agua contaminada utilizada para extinguir el incendio. No descargarla en la red de alcantarillado. Si es posible, desde el punto de vista de la seguridad, retirar de inmediato del área los contenedores no dañados.

3.2.3. Diagrama Presión (bar) – Entalpía (KJ/Kg)

- Refrigerante R134a

