



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

Buenas prácticas en instalaciones de producción de frío con refrigerantes A2L

Autor:

Jorqui Martínez, David

Tutor:

**Andrés Chicote, Manuel
Departamento de Ingeniería
Energética y Fluidomecánica**

Valladolid, julio de 2023.

Contenido

1.	Motivación y objetivos.....	7
2.	Revisión bibliográfica y contexto actual	9
2.1	Breve historia de los refrigerantes	10
2.2	Ciclo de compresión	13
2.3	Clasificación de los refrigerantes	15
	Clorofluorocarbonos (CFC).....	15
	Hidroclorofluorocarbonos (HCFC)	15
	Fluorocarburos (FC).....	16
	Hidrofluorocarbonos (HFC)	16
	Hidrocarburos (HC).....	16
	Hidrofluoroolefinas (HFO)	16
	Inorgánicos	16
2.4	Refrigerantes A2L.....	17
2.4.1	Características de los gases A2L.....	19
2.5	Legislación vigente aplicable a los gases refrigerantes	20
3.	Protocolo de buenas prácticas en instalaciones con refrigerantes A2L..	23
3.1	Introducción	23
3.2	Buenas prácticas.....	23
3.3	Caso real de trabajo con A2L.....	31
4.	Análisis de una instalación frigorífica real.....	33
4.1	Introducción	33
4.2	Primeros pasos con CSO.....	34
4.1.1	Clima de funcionamiento.....	34
4.1.2	Intervalo de tiempo	35
4.1.3	Propiedades del perfil de cargas	37
4.1.4	Selección de equipos.....	39
4.3	Apartado económico	41
4.3.1	Costes de los refrigerantes.....	41
4.3.2	Coste de los equipos.....	41
4.3.3	Resultados simulación.....	42
4.3.4	Detalles de costes.....	42

4.3.5	Energy Efficiency Ratio EER	44
5.	Conclusiones y trabajo futuro	47
6.	Bibliografía	49
7.	Anexos	51

RESUMEN

El presente Trabajo Fin de Grado aborda el estudio de instalaciones de producción de frío con refrigerantes A2L adaptadas a las restricciones cada vez más exigentes de la normativa nacional y comunitaria respecto al uso de sustancias con elevado potencial de calentamiento global. El trabajo se propone desde una doble perspectiva que cubra tanto la propuesta de una guía de buenas prácticas en la instalación y manejo de estos refrigerantes (con una clasificación de seguridad más exigente que los convencionales), así como el estudio económico comparativo de dos enfriadoras en el que se analice la influencia en el comportamiento energético global de las instalaciones al utilizar este tipo de refrigerantes.

PALABRAS CLAVE: refrigerantes, buenas prácticas, enfriadoras, eficiencia energética, calentamiento global

ABSTRACT

This Final Degree Project deals with the study of refrigeration production facilities using A2L refrigerants adapted to the increasingly stringent restrictions of national and EU regulations regarding the use of substances with high global warming potential (GWP). This work is proposed from a double perspective that covers both the proposal of a guide of good practices in the installation and handling of these refrigerants (with a more demanding safety classification than conventional ones), as well as the comparative economic study of two chillers in which the influence on the overall energy performance of the facilities when using this type of refrigerants is analyzed.

KEYWORDS: refrigerants, good practices, chillers, energy efficiency, global warming

1. Motivación y objetivos

La importancia de la industria frigorífica en nuestra sociedad es indiscutible. Desde los inicios en 1902, de la mano del ingeniero estadounidense Willis Haviland Carrier, se han tratado de mejorar y optimizar los sistemas de refrigeración y aire acondicionado.

Hacia los años 90 ha sido cuando se ha iniciado un enfoque en este avance tecnológico hacia la disminución de los efectos adversos sobre el medio ambiente. Ese es el motivo por el que los gases refrigerantes evolucionan y cada vez son menos contaminantes.

Estos efectos nocivos son dos, el daño producido a la capa de ozono y la contribución al efecto invernadero. El primero de ellos se cuantifica a través del ODP (Ozone Depletion Potential) y la mayoría de los refrigerantes que se utilizan hoy en día apenas producen ese efecto. El segundo se cuantifica con el GWP (Global Warming Potential), o PCA (Potencial de Calentamiento Atmosférico, en castellano). Es este segundo efecto, el que contribuye al efecto invernadero el que ha motivado la actual evolución de los refrigerantes hacia una industria en la que los gases refrigerantes tengan los menores valores de PCA posibles.

En los inicios de las regulaciones de refrigerantes estuvieron motivadas a mitigar los efectos sobre la capa de ozono, problema que fue solucionado con la eliminación de los CFCs y HCFCs (clorofluorocarbonados e hidroclofluorocarbonados). Una vez solucionado ese primer inconveniente, el trabajo de mejora se ha centrado en reducir el efecto invernadero con el desarrollo entre otros de los refrigerantes A2L.

El fin que persigue este documento es principalmente mostrar qué son los refrigerantes A2L, por qué se comienzan a utilizar y cuáles son sus ventajas, así como sus desventajas. Todo esto acompañado de un capítulo en el que se explicarán con detalle las reglas básicas de seguridad que deben seguirse cuando se trabaja con este tipo de refrigerantes. A estos consejos de utilización le acompañará una pequeña enumeración de los peligros más habituales cuando se trabaja con refrigerantes, en especial los A2L, con el fin de concienciar y mitigar, en la medida de lo posible, el riesgo de accidentes futuros.

Una vez terminada esta guía de utilización y peligros más comunes, se mostrarán los resultados obtenidos de una simulación realizada con el software CSO 2.90 (Chiller System Optimizer). En esta simulación, gracias al poder de cálculo de este software (propiedad de Carrier), hemos sido capaces de enfrentar dos enfriadoras de características muy similares para descubrir cuál es el resultado de cambiar de los refrigerantes actuales por los novedosos A2L.

2. Revisión bibliográfica y contexto actual

Es innegable el peso de la tecnología frigorífica en nuestra sociedad. Una manera de ratificarlo es darse cuenta del tamaño de la ingeniería que se ocupa de la transferencia de calor. En la industria del frío, se podrían distinguir tres grandes grupos en función de su objetivo final. Estos son la refrigeración, la climatización y las bombas de calor.

Dentro de la industria de la refrigeración podemos diferenciar campos o subdivisiones más específicas como puede ser el frío industrial o la refrigeración en transportes. El objetivo aquí es proporcionar bajas temperaturas debido a las necesidades de los procesos industriales que se desarrollan en esos lugares. Además, suelen ser precisas unas condiciones de humedad específicas por lo que los equipos que se utilizan aquí son equipos con alta capacidad frigorífica y con la posibilidad de controlar las condiciones de humedad. Un ejemplo de este grupo pueden ser las cámaras frigoríficas, que pueden estar construidas en naves industriales o en la caja de un camión. Pueden parecer diferentes pero el trabajo que realizan es el mismo.

Otra subdivisión engloba la climatización, no confundir con refrigeración. Cuando hablamos de climatización aparece el factor humano, ya que la climatización se encarga de proporcionar unas condiciones de temperatura y humedad que sean agradables para las personas. Esto se traduce en que los espacios en los que habitualmente hay gente, como pueden ser oficinas, hospitales, hoteles, viviendas o incluso la universidad deben estar en posesión de equipos de climatización para proporcionar confort térmico a las personas que se encuentren ahí.

Y como último grupo podemos mencionar las bombas de calor. Las diferenciamos así principalmente por el objetivo que persiguen. Al igual que cuando hablamos de refrigeración y climatización solemos pensar en frío, en ocasiones necesitamos proporcionar calor. Es aquí donde entran en juego las bombas de calor, utilizadas entre otras actividades para proporcionar calefacción y sobre todo ACS (agua caliente sanitaria). Reciben el nombre de bombas ya que se puede establecer una similitud entre las bombas de calor y las bombas de agua. Una bomba de agua se utiliza para elevar el agua de un punto a otro a mayor altura. Para ello es necesario vencer la fuerza de gravedad. Una bomba de calor recibe su nombre porque se emplea para “bombear” la energía en forma de calor de un foco a baja temperatura a otro a una temperatura superior, venciendo el sentido normal de transferencia de calor, gracias al trabajo aportado desde el exterior. Una vez explicadas las ramas o subgrupos de la refrigeración, podemos confirmar que hay un elemento común a todos ellos y que sin él sería imposible su funcionamiento. Este elemento es el refrigerante.

La historia de los refrigerantes es larga y variada y se remonta al siglo XIX. Desde este momento se han empleado decenas de refrigerantes diferentes sin que ninguno de estos se haya alzado como claro vencedor y haya sido empleado mayoritariamente en la industria. Esto se debe a la gran variedad de fluidos utilizados como refrigerante y las diferentes características y prestaciones que poseen cada uno de ellos. Más adelante se comentarán los diferentes tipos de refrigerantes y se mencionarán sus características más destacadas. Ahí podremos comprobar que no existe el refrigerante perfecto.

2.1 Breve historia de los refrigerantes

Podríamos decir que la historia de los refrigerantes se inició con Oliver Evans, quien en 1805 ofreció una primera definición de refrigerante. Fue Evans el que descubrió que el dietiléter a bajas presiones reducía su punto de ebullición llegando a colocarse por debajo de la temperatura ambiente, lo que permitía producir frío con su evaporación. Junto con este descubrimiento, desarrolló la posibilidad de crear un circuito cerrado por el que hacer circular dicho fluido y condensarlo con la ayuda de un condensador de agua. Estos descubrimientos alentaron a Jacob Perkins, considerado el padre de la refrigeración, a definir en 1834 una patente que describía un ciclo que utilizaba un *fluido volátil con el fin de producir el enfriamiento y la congelación... y al mismo tiempo condensar dichos fluidos volátiles para poder ser reutilizado* [1].

Al principio, entre 1830 y 1930, se empleaban sustancias naturales como refrigerantes. Estas eran muy conocidas y poseían altas volatilidades como por ejemplo el amoníaco, el agua, el dióxido de carbono, dióxido de azufre o hidrocarburos como el propano o el isobutano. La tónica general de estos refrigerantes era que se trata de sustancias, a excepción del agua, con dificultades de carácter tecnológico, son inflamables, tóxicas o ambas. Algunas como el ácido fórmico, también empleado en los inicios, es altamente radiactivo. Este es el motivo de que los accidentes fuesen demasiado frecuentes en esa época.

En 1922, una campaña publicitaria anunciaba el propano (R-290) como una alternativa segura e inolora a los refrigerantes de la época. Esto choca con la clasificación actual de este compuesto, incluido en el grupo de baja seguridad debido a su alta inflamabilidad. Esto nos permite hacernos una idea de la inseguridad que se vivía en esos años en el ámbito de la refrigeración.

No fue hasta 1924, cuando Willis Carrier y R.W. Waterfill publicaron el primer análisis comparativo de refrigerantes. En este documento se afirma que el (1,2-dicloroetileno) es el más adecuado como fluido refrigerante en su enfriadora de agua. En cambio, debido al mal rendimiento, el CO₂ fue descartado. A su vez, se descartaron el agua y amoníaco debido a la necesidad de varios ciclos de compresión.

Con el objetivo de extenderse en ámbitos que no solo fuese el industrial, la refrigeración necesitaba emplear refrigerantes que no fuesen tóxicos o inflamables, por eso Midgley y Henne fueron los encargados de encontrar ese fluido. Lo que buscaban era un compuesto que tuviese un punto de ebullición bajo, que no tuviese reactividad y que la toxicidad e inflamabilidad fueran lo más bajo posible. Estos dos químicos se dieron cuenta de que el fluido que buscaban debía estar compuesto por carbono, oxígeno, nitrógeno, hidrógeno, sulfuro, bromo, cloro o flúor y tras comprobar que los refrigerantes utilizados hasta entonces descubrieron que poseían esos elementos en su composición a excepción de uno; el flúor. Fue en 1930 cuando publicaron un estudio en el que mencionaban cómo afectaban tanto el flúor como el cloro a la volatilidad e inflamabilidad de los refrigerantes.

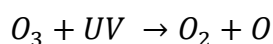
Pero no fue hasta 1932 cuando se comercializó el primer refrigerante, el R11. Se diferenció de sus predecesores, los CFC, y anteriormente los HCFC, porque se consiguió que llegar a los hogares y mercado doméstico. Sin embargo, en frigoríficos y en la climatización de los vehículos se utilizó el R-12 y en la industria destacaron el amoníaco y el R-22. Posteriormente, en la climatización doméstica se empleó R-22. En el sector comercial se utilizó ampliamente el R-502 que consiste en una mezcla del HCFC R-22 y el CFC R-115.

Más adelante (1974), los químicos F. S. Rowland y Mario Molina publicaron su artículo “Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone” en el que definieron por primera vez la teoría del agotamiento de la capa de ozono.

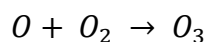
Según lo publicado en su artículo, las moléculas procedentes de los refrigerantes del tipo CFC y en menor medida HCFC son capaces de llegar a la estratosfera debido a su estabilidad química. Una vez allí, las moléculas se disocian según

Los átomos de cloro que provienen de las mencionadas moléculas reaccionan con el ozono produciendo oxígeno y monóxido de cloro. Este monóxido de cloro posee un radical libre y en conjunto con un átomo de oxígeno proveniente de forma natural de la atmósfera, produce una molécula de oxígeno y un átomo de cloro. El problema radica en la utilización de ese átomo de oxígeno, que al emplearse aquí no puede reaccionar con las moléculas de oxígeno para producir el ozono.

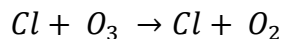
Ecuación 1



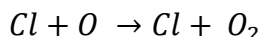
Ecuación 2



Ecuación 3



Ecuación 4



Fue este artículo, con su explicación sobre cómo se destruye la capa de ozono, lo que les hizo ganar el premio nobel en 1995. Anteriormente, en 1985 se confirmó la teoría con las investigaciones realizadas en la Antártida, en concreto en la base Halley. En 1988 confirmaron que los niveles de ozono eran aproximadamente un 30% menores a las que se observaron en los años setenta.

El Protocolo de Montreal [2] estableció la eliminación gradual de los CFC y otros productos químicos que agotan la capa de ozono. Los países firmantes acordaron reducir la producción y el consumo de estas sustancias en un calendario establecido. A medida que se iban desarrollando alternativas más seguras, se fue reduciendo el uso de los CFC y otros productos químicos similares.

Desde la entrada en vigor del Protocolo de Montreal, la producción y el consumo de CFC y otras sustancias agotadoras de la capa de ozono ha disminuido significativamente. El acuerdo también ha sido enmendado varias veces para incorporar nuevos productos químicos que se han descubierto que también tienen un impacto negativo en la capa de ozono.

El éxito del Protocolo de Montreal se debe a la cooperación internacional y al compromiso de los países firmantes para proteger el medio ambiente y la salud pública. Hoy en día, el Protocolo de Montreal es un ejemplo de cómo la cooperación internacional puede tener un impacto positivo en la protección del medio ambiente y la salud humana.

Entre 1830 y 1930 los refrigerantes utilizados eran gases como el dióxido de carbono (CO₂), el amoníaco (NH₃) y el dióxido de azufre (SO₂). Estos gases eran utilizados en sistemas de refrigeración y aire acondicionado para enfriar y congelar alimentos y otros productos.

Sin embargo, a medida que se desarrolló la tecnología de refrigeración y se hicieron más eficientes los sistemas, se descubrió que algunos de estos gases eran tóxicos, inflamables o dañinos para la capa de ozono. Por ejemplo, el amoníaco es tóxico y puede ser mortal en grandes cantidades, mientras que el dióxido de azufre es un gas de efecto invernadero y contribuye al calentamiento global.

En la década de 1930, se desarrolló un nuevo refrigerante llamado clorofluorocarbono (CFC), que se convirtió en el refrigerante más popular y utilizado durante varias décadas. Los CFC eran gases no tóxicos y no inflamables. Sin embargo, en la década de 1970 se descubrió que los CFC y

otros compuestos similares eran dañinos para la capa de ozono y contribuían al agotamiento de esta capa.

A partir de ese momento se inició una búsqueda para encontrar un refrigerante alternativo que fuera más seguro y menos dañino para el medio ambiente. En la década de los noventa se desarrollaron los hidroclorofluorocarbónos (HCFC), que se consideraron una alternativa más segura a los CFC. Sin embargo, aunque los HCFC no eran tan dañinos para la capa de ozono, todavía contribuían al calentamiento global.

En la década de los dos mil, se desarrollaron los hidrofluorocarbonos (HFC), que se convirtieron en la opción más popular para los sistemas de refrigeración y aire acondicionado. Los HFC no dañan la capa de ozono, pero siguen contribuyendo al calentamiento global.

Actualmente se están desarrollando nuevos refrigerantes que son más seguros y menos dañinos para el medio ambiente. Entre ellos se encuentran los A2L, que son refrigerantes con un bajo potencial de calentamiento global y un bajo potencial de inflamabilidad. Los A2L son considerados una opción prometedora para el futuro de la refrigeración y el aire acondicionado, y se espera que reemplacen gradualmente a los HFC en los próximos años.

2.2 Ciclo de compresión

Los refrigerantes A2L funcionan de manera similar a los refrigerantes tradicionales. El proceso de refrigeración implica la transferencia de calor del espacio a enfriar hacia el refrigerante, que se encuentra dentro de un circuito cerrado de tuberías. El refrigerante cambia de estado de líquido a gas y viceversa en diferentes etapas del ciclo de refrigeración. En el ciclo de compresión de un sistema de refrigeración intervienen dos fenómenos:

Al evaporarse un refrigerante líquido absorbe calor, fenómeno que hace bajar la temperatura del ambiente que lo rodea.

Al condensarse el vapor refrigerante cede calor, que elevará la temperatura del ambiente que lo rodea.

El ciclo puede ser seguido desde cualquier punto del sistema representado en la Figura 1, que presenta el caso en el que nuestro compresor sea de pistón. La primera es un esquema del ciclo, la segunda es un diagrama presión-entalpía de un ciclo de compresión, Figura 2.

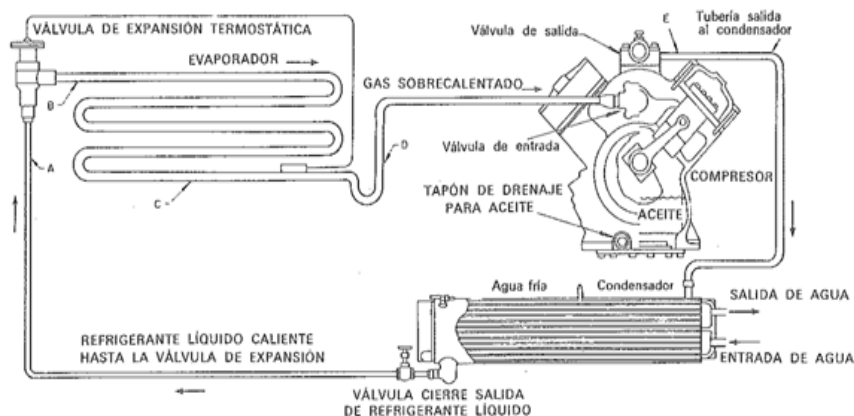


Figura 1. Esquema del ciclo frigorífico con un compresor de pistón. [3]

Comenzando en el punto A antes del evaporador, en la Figura 2, el refrigerante está en estado líquido, la entrada de líquido en el evaporador está controlada por la válvula de expansión que es accionada por la temperatura y la presión. La presión del refrigerante a través de la válvula desciende desde la presión existente en el condensador, punto A, hasta la presión existente en el evaporador, punto B. La válvula actúa como regulador de los límites de alta y baja presión entre las que trabaja el evaporador.

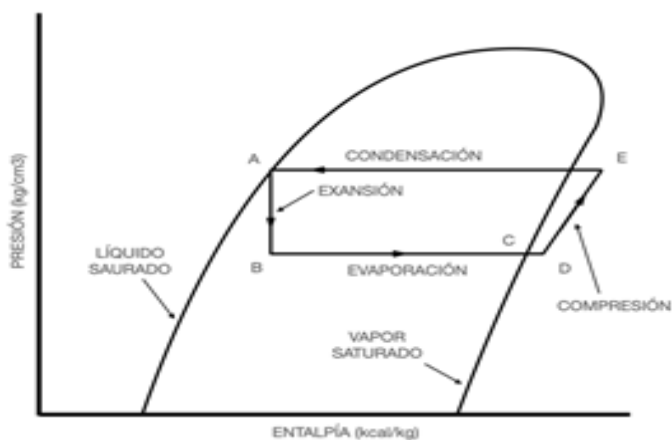


Figura 2. Diagrama presión-entalpía del ciclo de compresión-Elaboración propia.

La reducida presión existente en el evaporador permite que el refrigerante hierva y se evapore. Para favorecer la ebullición, el calor del aire o de otro medio que haya de ser enfriado es transmitido a la superficie del evaporador y transferido al líquido que está hirviendo a temperatura más baja. La mezcla de líquido refrigerante y vapor, del mismo modo que pasa por el serpentín del evaporador, continúa absorbiendo calor hasta que se evapora por completo, punto C. El sobrecalentamiento del gas, controlado por la válvula de expansión, tiene lugar desde C hasta D.

El gas sobrecalentado alcanza el compresor a través de la tubería de aspiración. Una vez en el compresor, este se encarga de comprimir el gas. Esta

presión depende del tipo de compresor, siendo los más extendidos en la industria los compresores de scroll y tornillo, aunque para mayores demandas de frío se pueden emplear centrífugos.

Tras la compresión, el fluido eleva su temperatura y alcanza el punto E. La válvula de salida del compresor es la encargada de impedir el retorno de este gas al compresor una vez ha salido de este. Esa sobrepresión empuja al gas a la salida del compresor y llega entonces al condensador.

En el condensador, se produce el intercambio de calor entre el fluido refrigerante, que se condensa liberando energía, y el refrigerante secundario, que suele tratarse de agua dulce. Esa agua dulce absorbe ese calor aumentando su temperatura. El refrigerante líquido es recogido en un depósito receptor, que puede estar combinado o no con un condensador.

Después el líquido es impulsado por la tubería hasta la válvula de expansión A, donde vuelve a comenzar el ciclo.

Este es el funcionamiento de un ciclo de compresión simple en el que se utiliza un compresor de pistón, muy utilizado durante años debido a la facilidad con que se pueden reparar. Se pueden desmontar por completo, reparar o sustituir el elemento dañado, volver a montar y continuar utilizándolos.

2.3 Clasificación de los refrigerantes

La manera más extendida de clasificar los diferentes fluidos refrigerantes es atendiendo a los elementos químicos que los componen, formando así compuestos orgánicos e inorgánicos. A los refrigerantes que entre sus componentes poseen cloro o flúor se les llama también halogenados. Y cabe mencionar que los clasificados como orgánicos es posible encontrarlos en la naturaleza, como por ejemplo algunos hidrocarburos.

Clorofluorocarbonos (CFC)

Los CFC, halogenados compuestos por Cloro, flúor y carbono, fueron muy comunes en la década de los ochenta del siglo XX, pero fueron prohibidos debido a su impacto en la capa de ozono. Son compuestos muy estables y por tanto capaces de alcanzar la atmósfera con relativa facilidad. Sin embargo, esta estabilidad es una ventaja para las aplicaciones de refrigeración.

Hoy en día es ilegal usar CFC en nuevos sistemas de refrigeración. En este grupo destacan el R-11 y R-12. [4].

Hidroclorofluorocarbonos (HCFC)

Al igual que los CFC, son compuestos halogenados que además poseen hidrógeno. Fueron desarrollados con el objetivo de sustituir a los CFC ya que al añadir un átomo de hidrógeno la estabilidad de la molécula disminuía, haciendo que fuese más complicado que esta alcanzase la atmósfera. Un

ejemplo de estos compuestos es el R-22, refrigerante ampliamente extendido en la industria. [4].

Fluorocarburos (FC)

Se trata de compuestos químicos formados por enlaces de carbono-flúor. Tienen baja reactividad, pero la tendencia a romper este enlace es muy lenta. Esto provoca que el tiempo de residencia en la atmósfera sea alto y, aunque no destruyan la capa de ozono por no tener cloro en su molécula, el potencial de calentamiento atmosférico es alto.

Aun así, no son fluidos muy extendidos en la industria. Algún ejemplo de este tipo de refrigerantes son el R-14 o el R-116. [5].

Hidrofluorocarbonos (HFC)

Creados como sustitutos de los CFC y HCFC, son también compuestos halogenados, pero únicamente contienen en sus moléculas hidrógeno, flúor y carbono. Debido a la eliminación del cloro de su composición no afectan a la capa de ozono. Sin embargo, poseen flúor, que afecta negativamente al calentamiento global y efecto invernadero.

Ejemplos de este grupo son el R-134a y el R-32. Ambos refrigerantes están muy presentes en equipos de refrigeración tanto industrial como doméstica.

Hidrocarburos (HC)

Los hidrocarburos, como el propano (R-290) y el isobutano (R-600a), son refrigerantes naturales y no dañan la capa de ozono ni tienen un alto potencial de calentamiento global. Sin embargo, son inflamables y pueden ser peligrosos si no se manejan correctamente. [4].

Hidrofluoroolefinas (HFO)

Los HFO, como el R-1234yf o el R-1234ze(E), son una nueva generación de refrigerantes sintéticos orgánicos compuestos por carbono, hidrógeno y flúor, que tienen un bajo potencial de calentamiento global y no dañan la capa de ozono. En cambio, poseen una baja inflamabilidad, lo que dificulta su uso.

Inorgánicos

Refrigerantes como el CO₂, el amoníaco y el agua son inorgánicos. Son los que primero se utilizaron como tales. El amoníaco tiene ciertas ventajas como su alta eficiencia, su bajo costo y que es respetuoso con el medio ambiente, pero también tiene ciertos riesgos y desventajas en su uso como refrigerante, ya que es tóxico y puede ser peligroso en caso de fugas o si su manipulación la realizan técnicos no cualificados. El CO₂ es natural, no daña la capa de ozono y tiene un bajo potencial de calentamiento global. No es inflamable y no es tóxico pero su eficiencia como refrigerante es baja, aunque en la actualidad cada vez se utiliza en más instalaciones.

2.4 Refrigerantes A2L

Una vez comentados los diferentes tipos de refrigerantes existentes toca centrarnos en los refrigerantes clasificados como ligeramente inflamables, los A2L. Esta baja inflamabilidad se caracteriza por tener una velocidad de propagación de llama inferior a 10cm/s.

La característica principal de estos refrigerantes es su bajo poder de calentamiento global o atmosférico (PCA). Esta es su principal baza a la hora de introducirse en el mercado y expandirse tan rápido. Actualmente la legislación se está endureciendo y cada vez es más restrictiva. Por lo que los fabricantes y distribuidores de equipos de refrigeración prefieren trabajar con estos nuevos refrigerantes. Todo lo relacionado con la legislación se comentará más adelante.

Estos refrigerantes han sido desarrollados para reemplazar a los HFC actuales que tienen mayores valores de PCA. Por eso los refrigerantes A2L son considerados como una alternativa más sostenible a los refrigerantes actuales.

Estos compuestos químicos formados a partir de hidrocarburos y flúor reciben su nombre de la clasificación actual de refrigerantes según las Normas ISO 817 [6] y ASHRAE [7].

Esta clasificación divide los compuestos según dos parámetros principales: Toxicidad e inflamabilidad. Según esta clasificación existen una división entre tóxicos y no tóxicos. A los tóxicos o de alta toxicidad se les denomina con la Letra B y a los no tóxicos o de baja toxicidad con la letra A. La segunda clasificación se realiza en función de la inflamabilidad, como hemos comentado. En esta división existen tres grupos los cuales se identifican como no inflamable, que corresponde el número 1, inflamabilidad media, número 2 y alta inflamabilidad número 3. Actualmente se añade un grupo más, 2L. Este está situado entre el 1 y el 2 y en él se incluyen los refrigerantes ligeramente inflamables o levemente inflamables.

Tabla 1. Clasificación de los refrigerantes en función de su inflamación y su toxicidad.

				TOXICIDAD	
				Baja toxicidad	Alta toxicidad
INFLAMABILIDAD				A	B
Incremento riesgo - inflamabilidad	No inflamable	1	No propagan llama a +60 °C y 101,3 kPa	A1 (Ej: R-134a, R-410A...)	B1 (Ej: R123...)
	Baja inflamabilidad	2L	Propagación de la llama a +60 °C y 101,3 kPa	A2L (Ej: R-32, R-1234yf...)	B2L (Ej: R-717...)
			Límite inferior inflamabilidad (% o kg/m ³) ≥ 3.5 o 0.10		
			Calor de combustión < 19.000 kJ/kg		
			Velocidad de propagación de llama < 10 cm/s		
	Media inflamabilidad	2	Propagación de la llama a +60 °C y 101,3 kPa	A2 (Ej: R-152a...)	B2
			Límite inferior inflamabilidad (% o kg/m ³) ≥ 3.5 o 0.10		
			Calor de combustión < 19.000 kJ/kg		
	Alta inflamabilidad	3	Propagación de la llama a +60 °C y 101,3 kPa	A3 (Ej: R-290, R-600a...)	B3
			Límite inferior inflamabilidad (% o kg/m ³) < 3.5 o 0.10		
			Calor de combustión ≥ 19.000 kJ/kg		

En la Tabla 1 se indican las posibles combinaciones de refrigerantes dando lugar a 8 categorías: A1, B2, A2L, B2L, A2, B2, A3 y B3.

Los parámetros que se tienen en cuenta para la determinar la inflamabilidad según la clasificación mencionada son los límites superior e inferior de inflamabilidad y la velocidad de propagación y combustión de la llama.

Límite inferior y superior de inflamabilidad:

Límite inferior de inflamabilidad (LII) es la menor concentración que debe existir para que la mezcla gas refrigerante-aire sea capaz de arder por el efecto de una llama o chispa. Cuanto menor sea este límite, mayor riesgo, ya que será más fácil llegar a este límite con pequeñas fugas de refrigerante.

Límite superior de inflamabilidad (LSI) es la mayor concentración de gas en aire que permite que este pueda arder. Por encima de este valor la mezcla tendrá exceso de combustible y no será posible la ignición.

La inflamabilidad de los refrigerantes se determina mediante la prueba de inflamabilidad ASTM E-681 [8].

Entre los valores de LII y LSI la ignición es altamente probable y deben evitarse esas condiciones a toda costa. De la misma manera fuera de ese intervalo no puede producirse la ignición.

Velocidad de propagación de la llama. Es la velocidad más alta que puede alcanzar la llama laminar que se produce al incendiarse el refrigerante en una dirección en relación con el gas no quemado delante de esta.

Tabla 2. Características de diferentes gases refrigerantes.

Refrigerante (Nº ASHRAE)	Clase de segurida	PCA	Temperatura de autoignición (C)	Limite inferior de inflamabilidad (kg/m3)	Velocidad de propagación (cm/s)
R.1234yf	A2L	4	405	0,289	1,5
R-32	A2L	675	648	0,307	6,7
R-454A	A2L	239	-	0,278	2,4
R-454B	A2L	466	-	0,301	5,2
R-454C	A2L	148	-	0,291	1,6
R-152a	A2	124	455	0,13	23
R-290	A3	3	470	0,038	46

2.4.1 Características de los gases A2L

Los rasgos más característicos de estos refrigerantes ya han sido comentados. Hemos mencionado su bajo nivel de inflamabilidad, que probablemente sea la característica principal debido al peligro que añade a su uso, pero también hemos mencionado el bajo poder de calentamiento global. Estas dos son las principales características por las que su comercialización está en auge. A ellas se pueden añadir, por ejemplo, la posibilidad de funcionar en equipos condensados por agua o por aire. Esta polivalencia permite que sean utilizados en equipos que proporcionan solo ACS, calefacción y/o refrigeración (bomba de calor), o los tres servicios a la vez (multitarea), permitido así abarcar una mayor cuota de mercado por la posibilidad de ser utilizados en una gran variedad de equipos.

Los A2L poseen buenas capacidades frigoríficas y termodinámicas como refrigerantes trabajando en un amplio rango de temperaturas, además de requerir menor carga de refrigerante para ofrecer las mismas condiciones de funcionamiento. Esto hace que los equipos puedan ser más pequeños debido a que la cantidad de fluido refrigerante que tienen que mover por el circuito disminuye considerablemente.

Como se explicó en el capítulo dos, estos refrigerantes, al no poseer cloro en su composición, no son perjudiciales para la capa de ozono. Sin esos átomos de Cl la reacción de las ecuaciones 1 a 4 no puede producirse y por tanto el impacto disminuye considerablemente.

Algunos ejemplos de refrigerantes A2L incluyen el R32, que se utiliza en sistemas de aire acondicionado y bombas de calor. Este es un refrigerante altamente eficiente que tiene un PCA bajo (675). El R1234yf, otro A2L, se utiliza en sistemas de aire acondicionado para automóviles. Tiene un PCA muy bajo y es menos dañino para el medio ambiente que otros refrigerantes utilizados en automóviles. El R452B sin embargo se utiliza en sistemas de refrigeración comercial. Es un refrigerante eficiente que tiene un PCA muy bajo y es una alternativa más sostenible a los refrigerantes HFC.

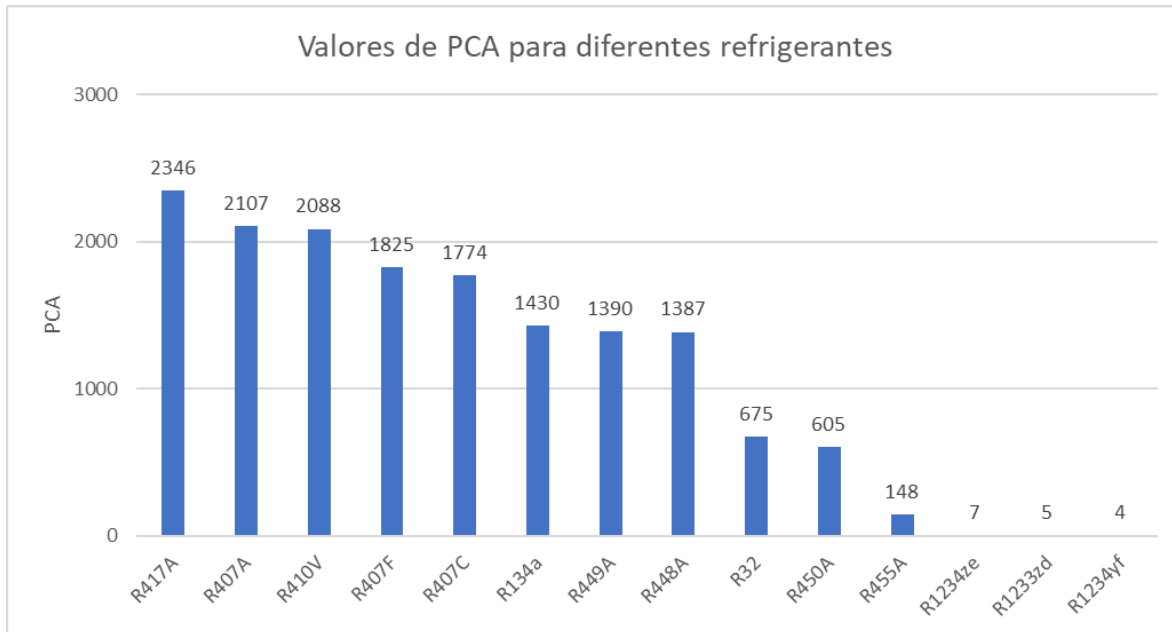


Figura 1. Niveles de PCA de algunos gases refrigerantes actuales. Fuente: Modificado de: https://www.researchgate.net/figure/GWP-values-for-the-refrigerants_fig1_282476360

2.5 Legislación vigente aplicable a los gases refrigerantes

En la Unión Europea, los refrigerantes A2L están regulados por el *Reglamento europeo sobre gases fluorados de efecto invernadero* [9]. Esta normativa establece reglas y medidas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y proteger la capa de ozono al limitar la producción, el uso y la emisión de gases fluorados de efecto invernadero (HFC, PFC y SF6).

Este reglamento establece requisitos específicos para el manejo y la comercialización de refrigerantes, además de establecer límites en la cantidad de refrigerante que se puede vender. También especifica los requerimientos que los técnicos de refrigeración y aire acondicionado deben poseer para ser certificados y capacitados para el manejo de refrigerantes A2L. Por último, establece requisitos para el etiquetado de los productos y para la recuperación y destrucción de refrigerantes usados.

A continuación se resumen los puntos más importantes de este reglamento:

- Prohibición de la comercialización de gases fluorados con un potencial de calentamiento global (GWP) igual o superior a 2.500 a partir del 1 de enero de 2020.
- Prohibición de la utilización de gases fluorados con un GWP igual o superior a 2.500 para el mantenimiento y la reparación de equipos existentes a partir del 1 de enero de 2020.
- Establecimiento de cuotas de producción y de importación de gases fluorados con un GWP inferior a 2.500 a partir del 1 de enero de 2015.
- Obligación de recuperar y reciclar los gases fluorados durante el mantenimiento y la reparación de equipos a partir del 1 de enero de 2015.
- Obligación de etiquetar los equipos que contienen gases fluorados y de llevar un registro de estos.
- Obligación de formar a los técnicos que manipulan equipos que contienen gases fluorados y de expedir certificados de aptitud a los mismos.
- Establecimiento de medidas de control y sanciones para el cumplimiento del reglamento.

En resumen, el *Reglamento 517/2014* [9] tiene como objetivo reducir el impacto ambiental de los gases fluorados de efecto invernadero mediante la limitación de su producción, uso y emisión, así como la promoción de su recuperación y reciclaje durante el mantenimiento y la reparación de equipos.

En España, la regulación de los refrigerantes A2L está establecida por el *Real Decreto 115/2017* [10], que transpone al ordenamiento jurídico español el *Reglamento (UE) 517/2014* [9]. El real decreto establece los mismos requisitos que el reglamento europeo, incluyendo los límites de venta, los requisitos de etiquetado y los requisitos de capacitación y certificación para los técnicos de refrigeración y aire acondicionado.

El *Reglamento (UE) 517/2014* [9] y el *Real Decreto 115/2017* [10] son normativas que tienen objetivos similares: reducir las emisiones de gases fluorados de efecto invernadero y proteger la capa de ozono. Sin embargo, existen algunas diferencias entre ambas normativas.

En primer lugar, el ámbito de aplicación. El *Reglamento (UE) 517/2014* [9] es una normativa europea que se aplica a todos los Estados miembros de la Unión Europea, mientras que el *Real Decreto 115/2017* [10] es una normativa española que solo se aplica en el territorio español.

Otra de las diferencias notables es el valor asignado al umbral de potencial de calentamiento global (GWP): El *Reglamento (UE) 517/2014* [9] establece una prohibición de comercialización y utilización de gases fluorados con un GWP igual o superior a 2.500 a partir del 1 de enero de 2020. Por otro lado, el *Real Decreto 115/2017* [10] establece esta prohibición para gases fluorados con un GWP igual o superior a 2.500 a partir del 1 de enero de 2022.

Y en cuanto a los requisitos de formación, el *Reglamento (UE) 517/2014* establece la obligación de formar a los técnicos que manipulan equipos que contienen gases fluorados y de expedir certificados de aptitud a los mismos, mientras que el *Real Decreto 115/2017* [10] establece la obligación de contar con personal debidamente cualificado para manipular estos gases, sin especificar la forma de acreditar esta cualificación.

Por último, en el apartado de medidas de control y sanciones el *Reglamento (UE) 517/2014* [9] establece medidas de control y sanciones para el cumplimiento del reglamento, mientras que el *Real Decreto 115/2017* [10] establece la posibilidad de sanciones en caso de incumplimiento, pero no especifica las medidas de control.

En resumen, aunque ambas normativas comparten objetivos similares, existen diferencias en los requisitos y medidas establecidos para la reducción del impacto ambiental de los gases fluorados.

3. Protocolo de buenas prácticas en instalaciones con refrigerantes A2L

3.1 Introducción

Una vez que se han introducido los refrigerantes A2L, se han explicado cuáles son sus características principales, en qué lugar se encuentran dentro de la industria de la refrigeración y cuáles son las legislaciones que los regulan, vamos a detallar cuáles son las prácticas que deben seguir los diferentes trabajadores de las empresas frigoristas para evitar en todo momento los posibles accidentes y peligros producidos del contacto con gases refrigerantes.

El objetivo principal de este capítulo es dar una visión general de las diferentes actuaciones que son recomendables para evitar los accidentes o minimizar las consecuencias de estos, si se produjeran.

Los accidentes con los refrigerantes, como con cualquier químico, son difíciles de eliminar pero sencillos de minimizar. Todo pasa por un trabajo riguroso de los técnicos acorde con las indicaciones y normativas existentes.

Como parte final y complemento a este capítulo se añadirá un caso real de trabajo para mostrar de forma práctica cómo se aplican estas recomendaciones.

3.2 Buenas prácticas

Los técnicos de refrigeración deben estar formados en los procedimientos descritos en las hojas de seguridad de cada producto en el momento de trabajar con cualquier gas refrigerante.

La manera en que las autoridades verifican que un trabajador está familiarizado con estos procedimientos es a través de las formaciones y capacitaciones obtenidas por él. En España es necesario poseer alguno de los certificados indicados en el RD 115/2017 [10] para realizar trabajos con gases fluorados.

Según este real decreto, existen diferentes niveles de acreditación en función de la formación recibida que permiten trabajar con unas cargas de gases refrigerantes u otras.

1. *Certificado acreditativo de la competencia para la manipulación de equipos con sistemas frigoríficos de carga de refrigerante inferior a 3 kg de gases fluorados.*
2. *Certificado acreditativo de la competencia para la manipulación de sistemas frigoríficos que empleen refrigerantes fluorados destinados a confort térmico de personas instalados en vehículos*

3. *Certificado acreditativo de la competencia para la manipulación de equipos de protección contra incendios que empleen gases fluorados como agente extintor.*
4. *Certificado acreditativo de la competencia para la manipulación de disolventes que contengan gases fluorados y equipos que los emplea.*
5. *Certificado acreditativo de la competencia para la recuperación de hexafluoruro de azufre de equipos de conmutación de alta tensión.*

El primer certificado permite la instalación de equipos con sistemas frigoríficos de carga menor de 3 kg de gases fluorados, su mantenimiento o revisión, incluida la carga y recuperación de refrigerantes fluorados de los mismos; la certificación para el cálculo de la carga de gas en equipos con sistemas frigoríficos de carga menor de 3 kg de refrigerantes fluorados, así como la manipulación de contenedores de gases fluorados refrigerantes. Por último, permite realizar el control de fugas de refrigerantes de acuerdo con el Reglamento (CE) n.º 1516/2007 de la Comisión, de 19 de diciembre de 2007 [11].

Este certificado, tal y como se indica en el ANEXO II 2.2 del RD 115/2017 [10], se puede obtener de diferentes maneras, pero básicamente hace referencia a los diferentes cursos de formación necesarios para su obtención.

El real decreto especifica también cuál es el temario que debe impartirse en estos cursos en el “ANEXO II PROGRAMAS FORMATIVOS”. En dicho texto se mencionan los puntos que deben tratarse en los diferentes cursos de manera que la formación recibida sea adecuada para garantizar un trabajo seguro.

Con el segundo certificado el técnico está capacitado para la instalación, mantenimiento o revisión, incluido el control de fugas, carga y recuperación de refrigerantes fluorados en vehículos, así como la manipulación de contenedores de estos gases.

De la misma manera que el certificado del punto 1. existen varios caminos para obtenerlo. Entre ellos la superación de un curso formativo diferente a los anteriores, pero con la misma estructura. El temario se encuentra también en el “ANEXO II PROGRAMAS FORMATIVOS”.

Como peculiaridad es adecuado comentar que uno de los métodos de obtención es: “Estar en posesión de cualquier título universitario oficial que acredite la adquisición de las competencias y conocimientos mínimos establecidos en el Programa Formativo 5 del anexo II.” Esto es, no será necesaria la superación del curso para las personas que posean estos estudios, los cuales deberían asegurar el conocimiento de la materia de los cursos formativos.

Los demás certificados acreditan para diferentes trabajos con refrigerantes fluorados pero no se ampliaron por no ser utilizados en la industria frigorífica.

Como resumen, el trabajador debe asistir a una serie de seminarios en los que recibe los conocimientos teóricos necesarios para trabajar de manera segura. En estos seminarios se realizan pruebas de conocimiento teóricas y una vez obtenida la calificación necesaria se procede a impartir clases prácticas. En ellas los trabajadores tienen la posibilidad de realizar, bajo la supervisión de un experto, una serie de intervenciones en equipos de refrigeración para adquirir la destreza necesaria. El objetivo es que, al terminar estos ciclos formativos, los alumnos estén en posesión de conocimiento y experiencia suficiente para trabajar de manera autónoma.

A continuación comentaremos las recomendaciones más relevantes:

Evitar trabajar en áreas cerradas y con poca circulación de aire.

Como se comentó en el capítulo 2, para que en un refrigerante se produzca una llama es necesario que la proporción de este en el aire esté dentro de unos límites de inflamabilidad. Comentamos que dentro de esos límites es probable que ocurra la ignición, pero fuera de ellos es imposible que se produzca.

Si se trabaja en sitios cerrados y con mala o nula ventilación es muy fácil sobrepasar el LII y entrar en esa zona de peligro donde la concentración de refrigerantes es óptima para el encendido. Podríamos pensar que al ser un recinto cerrado, si conseguimos superar el LSI trabajaremos de manera segura, ya que no hay posibilidad de que se produzca la llama; sin embargo, esto no es así. Esa opción no es viable, ya que no hay manera de asegurar que esa concentración no vaya a decrecer haciéndonos regresar a la zona de peligro. Además, estos gases pueden llegar a ser tóxicos si se respiran de manera prolongada, por lo que la mejor opción si se trabaja en ambientes confinados es forzar la ventilación. De esta manera eliminamos el peligro de la ignición y la toxicidad.

Cabe mencionar que estos límites podrían alcanzarse en lugares al aire libre donde las corrientes de aire sean muy débiles y puedan permitir la estratificación del aire. No se debe olvidar que encontrarse en esos valores de concentraciones es muy peligroso. La recomendación es utilizar medidores de concentración siempre para asegurar un trabajo seguro.

Mantener alejados de la incidencia del sol las botellas de refrigerante.

El gas refrigerante se almacena en contenedores bajo presión, por lo que se recomienda que se mantenga lejos de los rayos solares y en un lugar fresco,

así como lejos de chispas, llamas al descubierto, superficies calientes u otras fuentes de ignición.

Se ha mencionado ya en numerosas ocasiones en este texto que los refrigerantes A2L son inflamables, levemente, pero en definitiva inflamables.

Una de las acciones que debe cumplirse cuando se manipulan estos refrigerantes es mantener los envases (botellas de refrigerante) protegidos de las fuentes de calor. A nadie se le ocurre colocar un envase de desodorante en aerosol cerca del fuego. Así lo indica la etiqueta explícitamente y sabemos que si lo hacemos las consecuencias pueden ser fatales. Lo mismo pasa con estas botellas; un mal almacenaje de estos equipos puede desencadenar un fatal accidente.

Una vez terminada la vida útil del refrigerante, este y sus envases deben ser eliminados adecuadamente para minimizar los riesgos para la salud y el medio ambiente. Se debe seguir la normativa vigente para la eliminación de residuos peligrosos. Normalmente se hace cargo alguna empresa especializada, la cual cumple la norma y está autorizada para trabajar con refrigerantes, manipularlos y destruirlos.

Transportar de manera segura las botellas de refrigerante.

Otra recomendación relacionados con las botellas de refrigerante es su transporte. Y aquí debemos distinguir las dos formas de transporte principales que se producen con las botellas de gases refrigerantes, en vehículo y a pie por el técnico de turno. No obstante, se debe tener en cuenta en todo momento la legislación ADR (Acuerdo Europeo sobre el transporte internacional de cargas peligrosas por vía terrestre) relativa al transporte de mercancías peligrosas.

Este transporte estará permitido siempre y cuando sea para cantidades limitadas de refrigerante y únicamente desde el punto de recogida al emplazamiento de trabajo.

Cabe destacar que la ADR no es aplicable en el ámbito de la instalación y mantenimiento de instalaciones frigoríficas cuando la carga transportada sea la necesaria para el trabajo a desarrollar, es decir, no transportar más refrigerante del que se vaya a utilizar.

Durante el transporte es recomendable portar la documentación que acredite a la empresa como autorizada o habilitada en los trabajos con equipos de refrigeración.

Además, se debe consultar el documento *Acuerdo sobre transporte internacional de mercancías peligrosas por carretera (ADR) [12]*.

Según ese documento, el empleador debe transportar las botellas en posición horizontal dentro del vehículo, identificadas con la pegatina acorde al refrigerante que contenga con datos como el nombre del refrigerante, quien lo distribuye, pictogramas de advertencia, etc. Además, el vehículo dispondrá de chalecos reflectantes, señales de peligro, extintor de 2 kg y botiquín de primeros auxilios. Y es recomendable que dispongan de equipos de renovación de aire para evitar acumulaciones en caso de fuga. Si no fuese posible deberán equiparse con un letrero de al menos 25mm de altura que anuncie: “VEHICULO SIN VENTILACIÓN ABRIR CON CUIDADO”.



Figura 2. Ejemplo de señalización de ausencia de ventilación en un vehículo de transporte de refrigerantes.

En cuanto al transporte de botellas sin vehículo por el operario, la forma correcta de transportarlas es utilizando las carretillas especiales para botellas de refrigerante. De esta manera se evita que sean golpeadas o que se transporte de manera horizontal. Si no se dispusiese de estas carretillas, la manera correcta será situar la botella en vertical sobre el suelo, inclinarla ligeramente y hacerla girar sobre el eje vertical para desplazarla mientras la giramos.

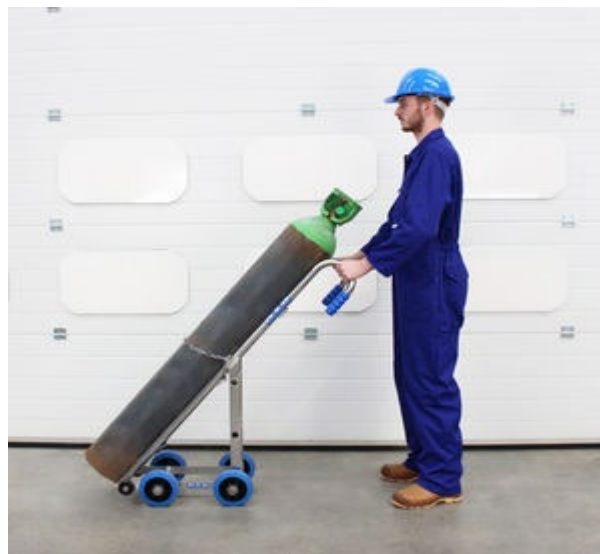


Figura 3. Ejemplo de transporte de botellas de refrigerante con ayuda de una carretilla manual.

Utilizar EPI especiales para los trabajos con refrigerantes.

Como parte de las buenas prácticas está la utilización de los Equipos de Protección Individual. En los cursos mencionados arriba se explican cuáles son, cómo se utilizan y cuándo son necesarios. Como norma general debe utilizarse botas de seguridad, ropa ignífuga y dieléctrica, guantes antiácidos y guantes de mecánico para proteger las manos y gafas para protegerse de posibles salpicaduras o proyecciones.

Si el trabajo fuese en alguna localización especial, como una sala de máquinas sin ventilación o cerca de maquinaria que produjese un ruido elevado, se utilizara además linternas, máscaras o protección auditiva.

Emplear personal altamente cualificado

Cuando se trabaja con refrigerantes la mejor herramienta que podemos tener es la información. Teniendo datos precisos acerca de los gases refrigerantes podemos conocer sus características principales y actuar en consecuencia con los diferentes tipos de gases que existen.

Dentro de estas características hay varios conceptos que son de vital importancia; entre ellos destacan el calor de combustión, la energía mínima de combustión y el ya mencionado límite de inflamabilidad, tanto superior como inferior.

- **Calor de combustión:** se define como la cantidad de calor que se libera al producirse la reacción de combustión de una sustancia. En nuestro caso el gas refrigerante.
- **Energía mínima de ignición (MEI):** con este término nos referimos a la energía requerida (en forma de chispa eléctrica medida en mJ) para

poder encender la mezcla de gas refrigerante y aire. La medida de referencia que se suele utilizar es la chispa producida por una bujía de alto voltaje (20-30 mJ).

Control de la inflamabilidad

Como se ha comentado, los A2L poseen calores de combustión mucho menores que los gases de la categoría A3. También se ha comentado la dificultad de encender una mezcla A2L-aire debido a los altos valores de MEI que poseen estos gases.

Con esto podemos concluir que en situaciones cotidianas la ignición de estos gases es difícil. Los artículos domésticos como secadores de pelo, calentadores de agua o taladros son incapaces de provocar la ignición. Esto se suma a la alta concentración de estos valores que sería necesaria para que estos equipos domésticos entrañaran algún riesgo [13].

Medición de las concentraciones de gas

Los técnicos, gracias a la capacitación recibida conocerán los límites de inflamabilidad de los distintos gases refrigerantes, lo que permite que, midiendo la concentración en el ambiente, se conozca si existe peligro de ignición.

Estos deben medir las concentraciones de gas en el ambiente antes de comenzar los trabajos, asegurando así que su intervención se realizará de manera segura. Generalmente trabajan con refrigerantes A1 (no inflamables) pero deben portar los medidores de concentración y hacer uso de ellos en todo momento.

Indicaciones de seguridad

Tanto las botellas que contengan gases inflamables como los equipos que los utilizan deben estar etiquetados de manera clara y estandarizada para indicar la peligrosidad y el tipo de refrigerante que contienen. Estas etiquetas son pictogramas que indican:

- La marca del fabricante
- Cantidad de gas que contienen en kg netos
- Tipo de refrigerante (nomenclatura y Número de registro CAS)
- Una advertencia de seguridad.



Figura 4

Esta señalización permite al técnico conocer con seguridad el tipo de refrigerante con el que va a trabajar. Además, deberá rellenar un impreso de seguridad, cumplir la normativa y utilizar únicamente equipos homologados para su uso con A2L.

Zona segura para el trabajador. Zona ATEX.

ATEX Atmósfera explosiva. Se denomina atmósfera explosiva a cualquier zona en la que se acumulen gases o polvo suspendido en el aire y pueda provocar una explosión. En nuestro caso, un área en el que se acumule una concentración de refrigerante A2L entre los límites de inflamabilidad será considerada ATEX.

Estas zonas se clasifican según la probabilidad de que exista esta atmósfera explosiva en:

- Zona 0: Presencia permanente o durante largos periodos de tiempo
- Zona 1: Susceptible de formarse en condiciones normales de trabajo.
- Zona 2: Presencia poco probable y por cortos periodos.

Dentro de estas zonas se debe evitar utilizar equipos eléctricos que puedan provocar cualquier tipo de chispa o descarga que provoque la explosión.

Se intentará mantener el área de trabajo lo más ventilado posible para evitar las ATEX siempre que sea posible.

Si se prevé que pueda ocurrir alguna emisión de gas refrigerante cuando realicen los trabajos normales, como son carga y recuperación de refrigerantes, se creará una zona de seguridad que podrá llegar a medir hasta dos metros. Dentro de esta zona estará prohibido realizar el vacío si se encuentra en un espacio confinado. En esta situación se debe colocar una manguera para enviar el aire contaminado al exterior para disminuir la concentración de gas en la zona confinada no acumular refrigerante en el espacio confinado.

Como extra de seguridad, la recuperadora y la botella donde se recupera el refrigerante utilizado por el frigorista deben estar conectados a tierra certificada (NOM-022-STPS) para evitar cualquier descarga electrostática.

3.3 Caso real de trabajo con A2L

Como complemento a las recomendaciones de seguridad se ha decidido incluir un pequeño apartado en el que se cuente el procedimiento de trabajo de don técnicos frigoristas en una salida rutinaria a una reparación en un equipo de refrigeración.

Primeramente se recibe un aviso en la central solicitando la asistencia del servicio técnico. En el aviso mencionan que puede haber ocurrido una fuga de gas refrigerante. Y gracias a la base de datos de la empresa pueden comprobar el equipo del que se trata. Con esto conocen la potencia y gas refrigerante que utiliza para enviar a los técnicos adecuados. En esta ocasión se trata de gas A2L.

Con esa información y las características del equipo se seleccionan dos técnicos y se envían para llevar a cabo la reparación.

Los técnicos al ser avisados acuden al almacén y se equipan para el trabajo. Esto consiste en seleccionar los EPI adecuados para esta salida y subir al vehículo la herramienta necesaria.

En esta ocasión el equipo de protección estará constituido por guantes anti ácidos, gafas de protección, mascarillas y ropa ignífuga.

En cuanto a la herramienta, necesitarán varilla de estaño y un soldador, tubo de cobre para reparar la posible fuga. También equiparan un cortatubos, llaves inglesas y herramientas menos específicas.

Normalmente se equipan también con algo de gas refrigerante por si la fuga fuese considerable y necesitasen recargar el equipo. En este caso no lo llevarán ya que acuden poco tiempo después al aviso de fuga y se entiende que no habrá perdido demasiado gas.

Cuando llegan al lugar, en este caso se trataba de un supermercado, se identifican ante el responsable y se dirigen al lugar donde se encuentra el equipo averiado. Se trata de una vitrina expositora de productos lácteos que utiliza el refrigerante R454A, un gas A2L con un PCA de 238. Los operarios comprueban con un detector de fugas que la fuga se localiza en una de las uniones soldadas del circuito frigorífico.

Una vez en el lugar de trabajo, llevan a cabo los siguientes pasos para empezar a trabajar de forma segura:

- Desconectan el equipo de la red eléctrica y colocan carteles de advertencia para evitar que alguien lo vuelva a conectar.
- Ventilan la zona donde se va a trabajar para disipar el gas refrigerante y evitar que se acumule en el aire.

- Se equipan los EPI y verifican que funcionan correctamente.
- Preparan el material necesario para la reparación: soldador, estaño, tubo de cobre, cortatubos, llave inglesa, etc.

Una vez listos, los operarios proceden a reparar la fuga siguiendo los siguientes pasos:

- aíslan la zona en la que se encuentra la fuga dentro del circuito cerrando las válvulas que se encuentren aguas arriba y aguas abajo del punto.
- Cortan el tubo de cobre por donde se ha producido la fuga con el cortatubo y lo desechan en un recipiente adecuado.
- Limpian los extremos del tubo que han quedado al descubierto con un cepillo metálico y los ajustan con la llave inglesa.
- Colocan un trozo nuevo de tubo de cobre del mismo diámetro que el anterior y lo sueldan con el soldador y el estaño, asegurándose de que queda bien sellado y sin fugas.
- Comprueban con el detector de fugas que no hay ninguna otra fuga en el circuito frigorífico.
- Conectan el equipo a la red eléctrica y lo ponen en marcha para verificar que funciona correctamente y que alcanza la temperatura deseada.
- Retiran los carteles de advertencia y limpian la zona donde han trabajado.
- Informan al responsable del supermercado del resultado de la reparación y le entregan el parte de trabajo correspondiente.

Una vez el equipo vuelve a estar operativo los técnicos han terminado el trabajo y se retiran.

Esto es, de una manera resumida, el procedimiento de reparación de una fuga con A2L que los técnicos de empresas de mantenimiento como Carrier realizan en su día a día.

4. Análisis de una instalación frigorífica real

4.1 Introducción

Hasta ahora hemos comentado cuales son las características de estos nuevos refrigerantes, así como su forma de utilización para mantener la seguridad y se ha comentado también cual es la legislación vigente que regula su utilización.

Una forma de completar esta primera parte teórica es con una parte práctica. En esta ocasión se ha decidido realizar una comparativa entre enfriadoras comerciales marca Carrier para dar una visión de lo rentable que puede ser realizar este cambio de los refrigerantes, con altos valores de PCA a los nuevos fluidos ligeramente inflamables pero con menores emisiones nocivas.

Con esta comparativa se pretende comprender mejor cuales son las ventajas e inconvenientes del cambio de refrigerante, y si este cambio impulsado por el medio ambiente es beneficioso o no para nuestra economía. Analizaremos los gastos de cada equipo de cara a tomar la decisión de cambiar en un futuro.

En esta ocasión se ha decidido utilizar el software de cálculo CSO Chiller System Optimizer, Figura 7, de Carrier. Este software tiene como finalidad realizar un estudio comparativo económico que pretende poder ayudar en la decisión de compra de equipos de refrigeración. Con él podemos calcular los costes que conlleva el funcionamiento de una máquina durante un periodo de tiempo determinado por el usuario y conocer así cuál será el impacto económico.



Figura 5. Logotipo de Chiller System Optimizer CSO

La elección del software se toma debido a que cuando se trata de medir el uso de energía HVAC en edificios, el análisis del rendimiento del sistema y la economía de los sistemas de refrigeración, Chiller System Optimizer (CSO) de Carrier es la herramienta a utilizar. Además, debido a mi estancia en Carrier como becario durante la realización de este trabajo disponía de total acceso a

la herramienta ya que, de no ser así, debería haber comprado la licencia para poder utilizar esta herramienta.

Es el programa adecuado para estudiar sistemas de enfriadores existentes, aunque permite también analizar situaciones competitivas para aplicaciones de nueva construcción y modernización. Se trata de un software ampliamente utilizado en la industria dada su fiabilidad y precisión a la hora de realizar este tipo de cálculos.

Este software está pensado para comparar enfriadoras de la marca Carrier ya que es Carrier quien lo desarrolla y mantiene. No obstante, se podrían comparar enfriadoras de otras marcas si se dispone de suficiente información acerca de su funcionamiento y se implementan en CSO los parámetros necesarios.

4.2 Primeros pasos con CSO

CSO es un software complejo y potente que permite realizar estudios comparativos de hasta cuatro equipos de manera simultánea. En nuestro caso compararemos dos equipos, uno de ellos trabajará con R-134a y el otro con R-1234ze(E).

Para realizar esta comparativa primero debemos conocer algunos datos para introducir en el programa. Entre estos datos que llamaremos de entrada se encuentran el clima del lugar seleccionado para realizar el estudio, el perfil de cargas que soportará cada enfriadora, las enfriadoras que se compararán y datos económicos de los equipos para el mencionado comparativo económico.

El paso en el que se seleccionan las variables y como se definen en el programa es importante al igual que en cualquier simulación. Si queremos obtener unos resultados fiables deberemos haber sido cautelosos a la hora de escoger los valores de estas variables. Una mala elección o definición distorsionaría los resultados de la realidad que queremos analizar.

A continuación, se explica detalladamente cuales son estos parámetros y como se introducen en el software. Hemos elegido dos máquinas marca Carrier que trabajaran durante un año natural en Madrid. La manera de introducir estos datos es la siguiente:

4.1.1 Clima de funcionamiento

La primera variable que debemos introducir es el clima. Cuando decimos clima, en realidad es la localización geográfica donde se pretende estudiar el funcionamiento de los equipos. Se elige el lugar porque este Software posee una biblioteca de archivos en los cuales están cargadas las condiciones de los climas de las principales ciudades del mundo. Además, si la ciudad que se desea encontrar no se encuentra en la biblioteca del programa, se podrá descargar de internet un archivo con .cd5.

Al cargar uno de estos archivos el programa recibe los datos de temperatura, humedad, número de horas a las que la temperatura es la misma. Es la manera más cómoda de poder proporcionar al software todos los parámetros necesarios para conocer el clima en el que se desarrollará la simulación y realizar así los cálculos necesarios. Con estos archivos cargados el programa podrá recrear las condiciones que se esperan para ese lugar de una manera muy precisa.

4.1.2 Intervalo de tiempo

Una vez seleccionada el lugar, necesitamos saber cuándo se quiere llevar a cabo la simulación. Definiremos por lo tanto las fechas en las que se desea simular el funcionamiento de los equipos. Normalmente se simulan años completos por el hecho de que los equipos suelen ser caros y se instalan para largos periodos de tiempo. Aun así, puedes simular la cantidad de tiempo que consideres necesario.

En nuestro caso hemos decidido simular durante un año completo. También debemos indicar las horas de funcionamiento del equipo. No resultará lo mismo si se simula el funcionamiento 24/7 que si se establece un horario determinado de acuerdo a perfiles de uso de edificios, instalaciones, etc. En esta ocasión se ha decidido elegir un horario de lunes a viernes de 7:00 a 19:00 y los sábados de 7:00 a 14:00. Los domingos se decide que no funcionará el equipo. Esto nos da un total de 3120 horas de funcionamiento anuales.

Como se aprecia en la Figura 8, seleccionamos Madrid como localización para la simulación. Además de la ciudad, hemos introducido como '*Operating Calendar*' el año completo y más abajo en el apartado '*Hourly Operating Schedule*' el horario mencionado antes.

Además, el programa nos solicita tres datos más: '*Summer Desing Dry Bulb Temperature*', '*Summer Coincident Wet Bulb Temperature*' y '*Winter Desing Dry Bulb Temperature*'. Estas temperaturas las hemos obtenido directamente del fabricante, Carrier.

Si se quisiesen obtener estas temperaturas de manera empírica por no estar a disposición del usuario conviene saber que *la temperatura de bulbo húmedo es la temperatura que alcanza un bulbo húmedo cuando se igualan el flujo de calor por convección desde el aire hasta el bulbo, con el necesario para mantener la evaporación del bulbo al aire* [14], así como la temperatura de bulbo húmedo coincidente en verano es la temperatura de bulbo húmedo que se da a la par que la temperatura seca utilizada como temperatura seca de diseño en verano.

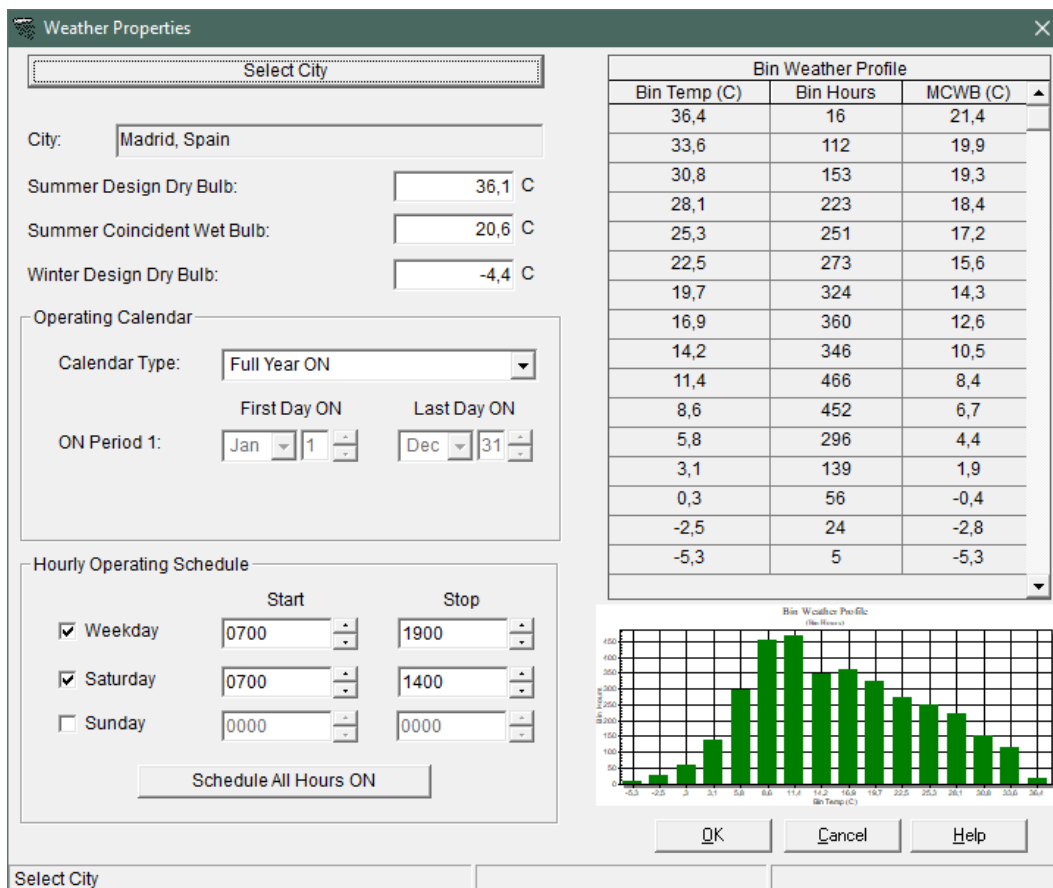


Figura 6. Pantalla de selección de clima y tiempo de funcionamiento dentro de CSO.

Sin embargo, los valores de humedad más altos suelen darse cuando las temperaturas de bulbo seco son más bajas. La temperatura de bulbo húmedo alta se utiliza para dimensionar torres de refrigeración y otros equipos evaporativos.

En la Figura 9 se representan las temperaturas que se producen en Madrid según el histórico cargado en el software frente a la cantidad de horas al año en que se producirán. Por eso esta gráfica nos da una idea de cuánto va a trabajar nuestra enfriadora. Si esta gráfica acumula máximos en temperaturas muy altas podremos suponer que nuestro equipo deberá trabajar para enfriar el local/edificio de esas altas temperaturas a otras de confort.

Sin embargo, si los máximos son cercanos a temperaturas más bajas como ocurre en nuestro caso, el equipo no tendrá una carga excesiva durante el año de funcionamiento. Si la temperatura exterior es de 10°C no vamos a necesitar enfriar el edificio, en todo caso necesitaremos calentarlo, pero para eso se dispondrían otros equipos.

Con estos datos el programa calculará los consumos y eficiencias de los equipos en función de las horas al año en las que la temperatura es la misma.

Es decir, el programa tiene los valores de temperaturas y de horas del año en las que se dan, como se muestra en la Figura 9, y con eso el software realiza una media ponderada.

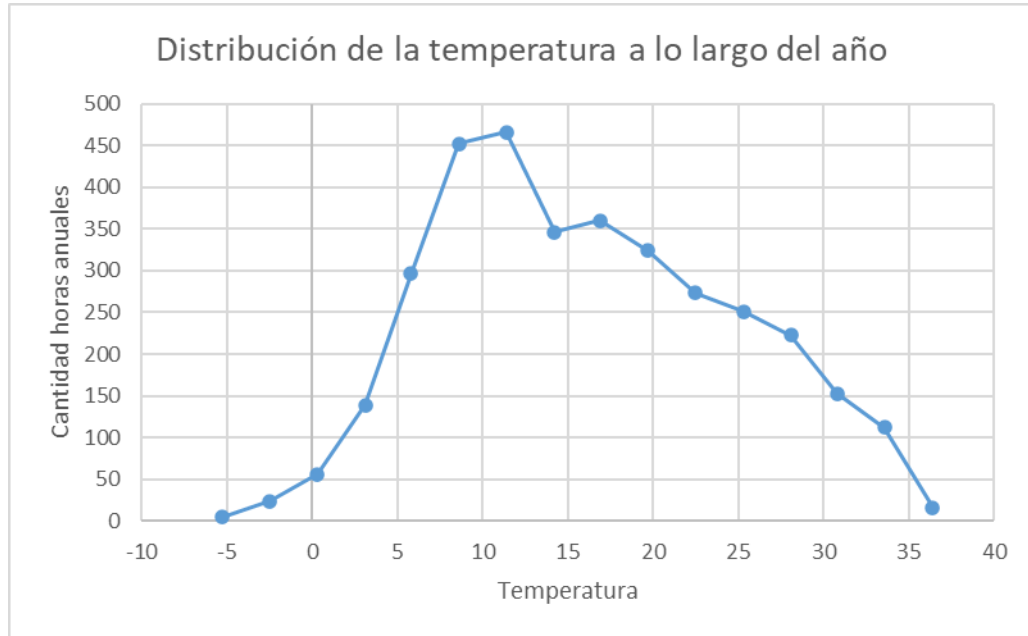


Figura 7. Distribución de la temperatura anual y su número de horas.

4.1.3 Propiedades del perfil de cargas

A continuación, el programa nos solicita que definamos cuál es el perfil de cargas al que estará sometido el equipo. Este dependerá de las condiciones que se den dentro del edificio a climatizar en conjunto con el tipo de aislamiento térmico que posea el edificio.

Nuestro equipo deberá funcionar diferente según las condiciones dentro del edificio y cual sea su comportamiento en cuanto al aislamiento.

Este perfil de cargas se puede construir de tres maneras en CSO. El primero de ellos es a través de dos puntos, los cuales definen una recta que refleja la variación de la carga con la temperatura. No es mala opción, pero por experiencia conocemos que estos perfiles no suelen ser una línea recta. Con lo cual si lo definimos así estaremos alejando los resultados de la realidad.

La segunda es a través de la gráfica que forman dos rectas. Es la que utilizaremos en nuestro caso. Esto se consigue a través de la opción de tres puntos. Esta opción es más fiel a la realidad y la aconsejable para definir el perfil de cargas siempre y cuando se dispongan de tres puntos.

Por último, se puede implementar un perfil de cargas punto a punto para el cual es necesario conocer todos los puntos que conforman el perfil ya que todos los

datos de este deben ser añadidos por el usuario. Es la opción más realista pero la más complicada. Se necesitan muchos valores para hacerlo realista y normalmente no se dispone de ellos.

Por eso elegiremos la segunda opción, tres puntos. Esta opción nos proporciona un equilibrio entre precisión y sencillez.

Estos puntos los obtenemos de la experiencia de simulaciones pasadas y normalmente las empresas utilizan valores de referencia en función del tipo de edificio y su función. Nosotros utilizaremos como puntos los definidos en la Tabla 3 que nos proporcionan la gráfica de la Figura 10.

Tabla 3. Valores utilizados para definir la curva del perfil de carga.

Punto	Temperatura (C)	Carga (kW)
1	36,4	1000
2	14,2	200
3	0	0

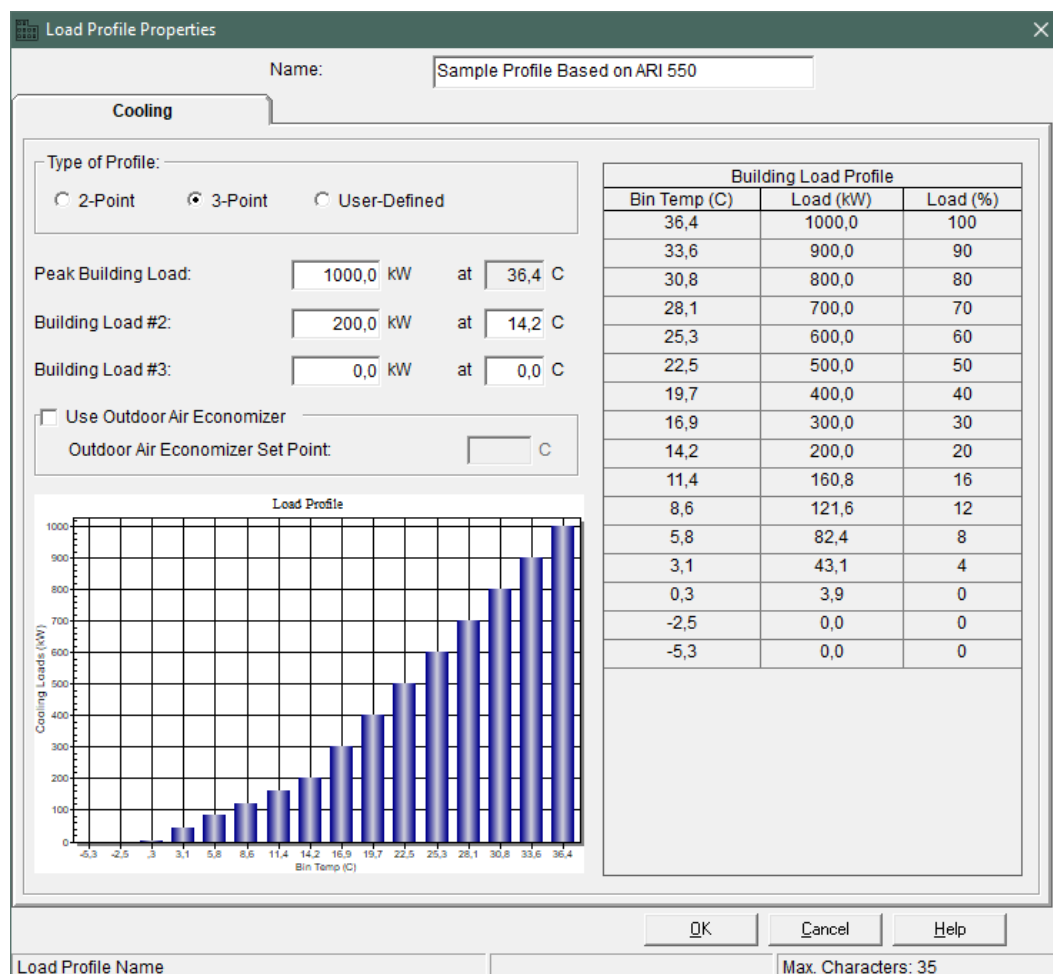


Figura 8. Ventana para la selección de la curva de carga del equipo en CSO.

4.1.4 Selección de equipos

Llegamos por fin al momento de definir los equipos que someteremos a estudio. Como adelantamos se trata de dos enfriadoras de Carrier las cuales son equivalentes y prácticamente iguales. La principal diferencia, motivo de estudio, es el refrigerante que utilizan. R-134a contra R-1234ze(E). Estos equipos han sido seleccionados teniendo en cuenta las características del clima, el perfil de carga y los demás valores que hemos comentado hasta ahora.

4.1.4.1 30KAV 1100

En primer lugar, se ha elegido una enfriadora marca Carrier condensada por aire y con compresor de tornillo. La enfriadora en cuestión es una 30KAV 1100. Esta enfriadora utiliza 199 kg de R-134a como refrigerante. Esta cantidad de refrigerante supone unas 285 toneladas equivalentes de CO₂.

Este equipo posee 1079 kW de potencia frigorífica y consume alrededor de 355 kW de potencia eléctrica. La ficha técnica de la máquina nos indica que posee un EER de 3.04 (todo ello en condiciones nominales). En la Tabla 3 se adjuntan las diferentes características del equipo.

4.1.4.2 30KAV-ZE 1100

Como alternativa a esta 30KAV, seleccionaremos una enfriadora de la misma familia, la 30KAV-ZE 1100, la cual es prácticamente idéntica, pero trabajando con R-1234ze(E) como fluido refrigerante. Por lo demás es también una enfriadora marca Carrier condensada por aire y con compresor de tornillo. En cambio, las toneladas equivalentes de CO₂ son mucho menores, 0,00152. La potencia eléctrica consumida son 246 kW y la potencia frigorífica 1146kW, valores muy similares a la anterior. El EER según la ficha técnica es 3.31 (todo ello en condiciones nominales). En la Tabla 3 se adjuntan las diferentes características del equipo.

Tabla 4 tabla con las diferentes características de las enfriadoras sometidas a estudio.

30KAV 1100

Información de funcionamiento		
Modo		Frío
Capacidad frigorífica	kW	1079
Eficiencia EER	kW/kW	3
Energía absorbida por el equipo	kW	355
Potencia sonora	dB(A)	100
Capacidad mínima	kW	137
Capacidad máxima	kW	1079
Condiciones de operación		
Elemento del ciclo		Frío
Intercambiador de agua		
Fluido	Tipo de fluido	Agua dulce
	Temperatura de salida	°C 7
	Temperatura de entrada	°C 12
	Fluid Flow	l/s 51,5
	Salto de presión	kPa 34,2
Intercambiador de aire		
Aire	Temperatura de entrada	°C 35
Altitud	m	0
Distancia a la costa	km	>3km
Información del equipo		
Lugar de fabricación		Montuel
Tipo de Refrigerante		R-134a
Cantidad de refrigerante	kg	199
Toneladas equivalentes de CO ₂	Toneladas	285
Número de circuitos de refrigeración		2
Número de fases del evaporador		2
Número de compresores		2
Número de Ventiladores		14
Energía absorbida por el ventilador	kW	23,9
Peso del equipo (son/sin carga)	kg	7399/7297
Dimensiones del equipo (LxWxH)	mm	9155x2262x2324

30KAV-ZE 1100

Información de funcionamiento		
Modo		Frío
Capacidad frigorífica	kW	1146
Eficiencia EER	kW/kW	3,3
Energía absorbida por el equipo	kW	346
Potencia sonora	dB(A)	100
Capacidad mínima	kW	117
Capacidad máxima	kW	1146
Condiciones de operación		
Elemento del ciclo		Frío
Intercambiador de agua		
Fluido	Tipo de fluido	Agua dulce
	Temperatura de salida	°C 7
	Temperatura de entrada	°C 12
	Fluid Flow	l/s 54,7
	Salto de presión	kPa 34
Intercambiador de aire		
Aire	Temperatura de entrada	°C 35
Altitud	mm	0
Distancia a la costa	km	>3km
Información del equipo		
Lugar de fabricación		Montuel
Tipo de Refrigerante		R-1234ze(E)
Cantidad de refrigerante	kg	254
Toneladas equivalentes de CO ₂	Toneladas	0,00152
Número de circuitos de refrigeración		2
Número de fases del evaporador		2
Número de compresores		2
Número de Ventiladores		18
Energía absorbida por el ventilador	kW	31,2
Peso del equipo (son/sin carga)	kg	7399/7297
Dimensiones del equipo (LxWxH)	mm	9155x2262x2324

4.3 Apartado económico

4.3.1 Costes de los refrigerantes

Un aspecto para tener muy en cuenta a la hora de realizar el estudio económico son los precios de refrigerantes. En nuestro caso estamos interesados en los refrigerantes R-134a y R-1234ze(E). Realizando una pequeña búsqueda por internet en las webs de diferentes proveedores de refrigerantes podemos obtener esta información.

A este precio deberemos sumar en cada caso si fuese necesario la cuantía de los impuestos a gases fluorados. El R-1234ze está exento de impuesto por lo que el precio será simplemente el precio de venta, pero no ocurre lo mismo con el R-134a, al cual deberemos añadir al precio de venta la cuantía de 21,45 € por kilogramo de gas refrigerante. Se muestran estos datos en la siguiente tabla.

Tabla 5

	Precio (€/kg)	Impuesto gas fluorado (€/kg)
R-134a	75	21,45
R-1234ze	104	–

Podemos observar entonces que los precios por kilogramo de estos gases difieren en apenas 30 euros. Esta diferencia favorece al R-134a por ser el más económico. Y es ahora el momento de mencionar que la principal diferencia en este apartado económico se sitúa en la obligatoriedad de abonar el impuesto sobre gases fluorados.

Como acabamos de explicar únicamente debe abonar el impuesto el R-134a. El valor del impuesto se calcula aplicando el coeficiente 0,015 al PCA del gas ($0,015 * 1430$), cuando este es menor de 2500. Así obtenemos el valor de 21,45 €.

Esto hace que los precios se equiparen con un total de $75 + 21,45 = 96,45$ €/kg para el R-134a, frente a los 104 €/kg del R-1234ze(E). Es por esto por lo que, a la hora de enfrentar estos dos refrigerantes concretos a un estudio económico, no obtenemos una clara ventaja de ninguno de los dos.

La diferencia principal radica en el PCA de cada gas, ahí si obtiene una ventaja indiscutible el nuevo R-1234ze(E) frente al conocido R-134a. Los respectivos PCA son de 7 frente a 1430.

4.3.2 Coste de los equipos

El porcentaje mayoritario del coste del proyecto es el equipo en cuestión.

A continuación, utilizaremos los precios de los equipos seleccionados, usando PVP, a los cuales añadiremos los precios del mantenimiento anual y las

posibles reparaciones que sufren este tipo de equipos para completar el estudio. En la siguiente tabla se recogen esos costes estimados por equipo.

Estos serán los precios que introduciremos en el software para que tenga en cuenta a la hora de calcular los costes iniciales.

Tabla 6

	30KAV 1100	30KAV-ZE 1100
Precio Venta Equipo	250.000,00 €	425.000,00 €
Instalación	15.000,00 €	15.000,00 €
Mantenimiento anual	5.000,00 €	5.000,00 €

4.3.3 Resultados simulación

Una vez establecidos todos los parámetros estamos en condiciones de iniciar la simulación.

Este programa, según la configuración utilizada nos presenta los siguientes resultados:

4.3.4 Detalles de costes

Como primer resultado de la simulación encontramos la siguiente tabla en la que se resumen los costes energéticos y sus respectivos gastos. El coste de la electricidad se supondrá de 0,200 €/kWh para esta serie de cálculos.

Tabla 7. Detalles de uso y coste energético

	(A) 30KAV 1100	(B) 30KAV-ZE 1100	Ahorro	Porcentaje de ahorro
Detalles del coste energético anual				
Coste eléctrico de la enfriadora (€)	41.988,00	44.670,00	2.682,00	-6%
Coste eléctrico de la bomba de agua (€)	3.244,00	3.268,00	24,00	-1%
Coste energético total	45.232,00	47.938,00	2.706,00	-6%
Detalles del uso energético anual				
Enfriadora (kWh/yr)	209.940,00	223.352,00	13.412,00	-6%
Bomba de agua de la enfriadora (kWh/yr)	16.220,00	16.339,00	119,00	-1%
Uso eléctrico total(kWh/yr)	226.161,00	239.691,00	13.530,00	-6%

De estos datos podemos obtener como conclusiones que el consumo de las enfriadoras es similar, variando alrededor de un 6%. Se observa que la enfriadora 30KAV-ZE 1100, utilizando A2L, es la que mayor consumo tiene. Esto se traduce evidentemente en un mayor coste anual en la factura eléctrica.

Ese aumento del coste de la electricidad consumida es de unos 2700 €/año, lo que es igual a 230€/mes aproximadamente.

Este aumento puede considerarse pequeño si se analiza la disminución de la contaminación de la enfriadora 30KAV-ZE 1100 respecto a su predecesora 30KAV 1100 teniendo en cuenta que los casi 200 kg de R-134a de esta enfriadora equivalen a 285 toneladas de CO₂ mientras que la sustituta planteada tiene un equivalente de apenas 0,00152 toneladas de CO₂.

Con esta diferencia abismal de contaminación, 230 euros mensuales es un aumento que deberíamos asumir para reducir la huella de carbono de nuestro sistema de climatización.

Adicionalmente se comprueba el cambio de consumo de las bombas de agua que poseen los equipos. Este es de alrededor del 1%. Unos 25€ anuales. No lo consideraremos significativo.

Como resumen de este apartado, con los equipos y las configuraciones seleccionadas obtenemos los costes que aparecen en la siguiente gráfica Figura 6.

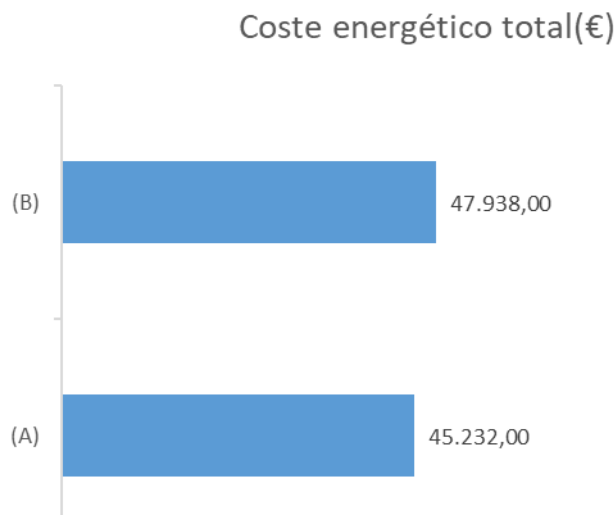


Figura 9. Coste energético anual de ambas enfriadoras.

Siendo estos costes de 47.938,00 € para la enfriadora 30KAV-ZE 1100 y 45.232,00€ para su equivalente en R-134a 30KAV 1100.

Cabe mencionar el apartado de costes de los equipos, su instalación y la carga de refrigerante. Una vez conocido el gasto del equipo en electricidad, deberíamos sumar el precio de ese equipo, su instalación y la carga de refrigerante para poder comprobar de manera real el precio del primer año de la instalación de cada equipo.

Esto es, si nuestro equipo con R-134a tiene un coste de 250.000,00€ y este equipo utiliza 199 Kg de refrigerante le debemos añadir un coste de los 199Kg con un precio de 75€/Kg más el impuesto sobre gases fluorados (21.45€/Kg). el precio del primer equipo será de

Tabla 8. Resumen de costes de instalación de los equipos

	30KAV	30KAVZE
Equipo	250.000,00 €	425.000,00 €
Refrigerante	14.925,00 €	26.416,00 €
Impuesto	4.268,55 €	0 €
Coste energía eléctrica anual	45.232 €	47.938 €
TOTAL (suponiendo vida útil 25 años)	1.399.993,55 €	1.649.866,00 €

4.3.5 Energy Efficiency Ratio EER

El Energy Efficiency Ratio (EER) es una medida de eficiencia energética que indica cuánta potencia frigorífica produce un sistema de refrigeración en relación a la potencia eléctrica que consume para producirla (ambas en kW). A lo largo de un periodo, se puede definir un EER estacional (SEER) que cuantifica la relación entre la energía frigorífica y la energía eléctrica consumida en ese periodo.

Cuanto mayor sea el valor del EER, más eficiente será el sistema de climatización, ya que estará produciendo más enfriamiento por unidad de energía eléctrica consumida.

En la siguiente gráfica, Figura 13, se puede apreciar una diferencia de 0,2 unidades de EER entre los equipos. El valor del EER especificado es el estacional a lo largo del año. El equipo más eficiente es la 30KAV 1100.

Esta diferencia de eficiencia puede deberse a varios factores, entre los que destacan que el R1234ze tiene una capacidad de enfriamiento ligeramente inferior a la del R134a [13]. Esto significa que se necesitará más refrigerante R1234ze para lograr la misma cantidad de enfriamiento que con R134a. Además, el R1234ze tiene una densidad ligeramente mayor que el R134a, lo que significa que se necesita una mayor cantidad de energía para mover el

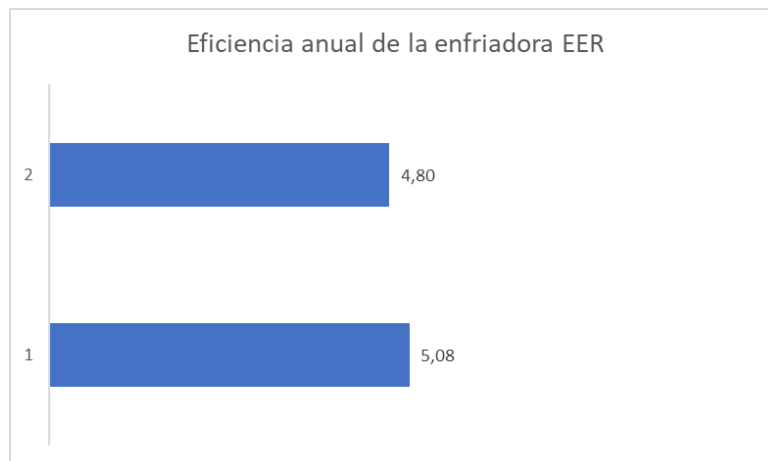


Figura 10. Comparación de la eficacia de las enfriadoras

refrigerante a través del sistema. Esto puede disminuir la eficiencia del compresor y, por lo tanto, reducir la eficiencia general de la enfriadora.

Tabla 9 Eficiencia anual de la enfriadora

Enfriadora	Eficiencia del sistema (EER)	Carga frigorífica (kWh)	Energía utilizada para enfriar (kWh)	Energía eléctrica utilizada (kWh)	Energía eléctrica utilizada por las bombas de agua (kWh)
1- 30KAV 1100	5,08	1.149.667	226.161	209.940	16.220
2- 30KAV-ZE 1100	4,80	1.149.667	239.691	223.352	16.339

Como resumen del análisis realizado con CSO, podemos comentar la gráfica de la Figura 14. En ella se representan varios parámetros de manera conjunta.

Por un lado, en color azul, se representa la carga frigorífica (Cooling Load) en kWh a la que se enfrentan nuestras enfriadoras. Estos datos se obtienen de la selección que hicimos del clima (elegimos la ciudad de Madrid). En el gráfico se aprecia que la carga aumenta a medida que aumenta la temperatura exterior, hasta los 28 – 30 °C. A estas temperaturas la máquina deberá vencer la carga térmica del interior del edificio utilizando el aire exterior, el cual se encuentra a temperaturas muy superiores a las que se necesita. Ese es el motivo principal por el que la carga aumenta.

Además, en la gráfica se pueden observar los diferentes valores del Ratio de Eficiencia Energética (Cooling System Efficiency EER) en el que se observa que difieren alrededor de 2 puntos a unas temperaturas de 12 °C.

A esas temperaturas más bajas la enfriadora tendrá que producir frío para vencer las cargas térmicas internas que se encuentren en el recinto a refrigerar pero lo hará de una manera más eficiente. Al igual que hemos comentado cuando la temperatura exterior es alta, si esta temperatura es inferior nuestro equipo necesitará intercambiar menos energía con el aire para alcanzar la temperatura de trabajo.

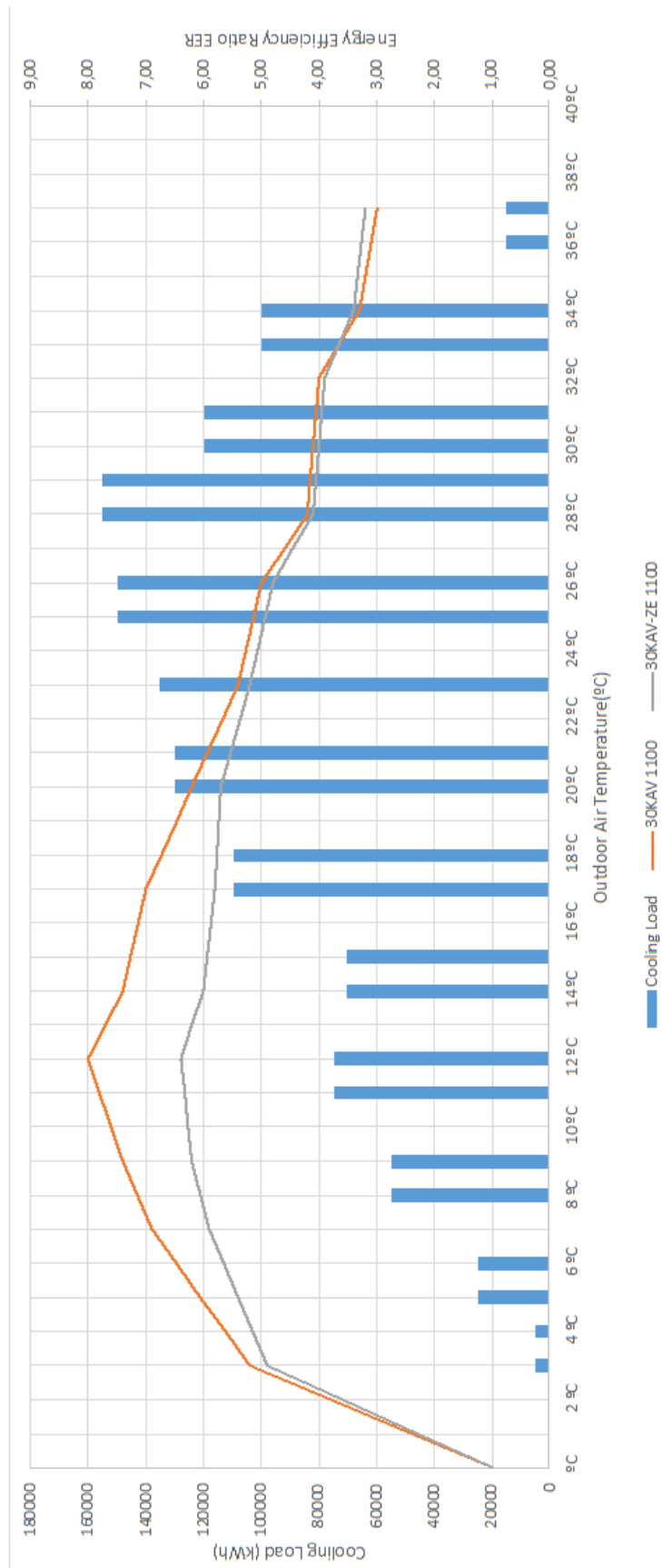


Figura 14. Eficiencia anual de los sistemas.

5. Conclusiones y trabajo futuro

No existe el refrigerante perfecto, tan siquiera el refrigerante ideal para una aplicación determinada.

Cuando se trata de escoger un refrigerante, no solo entran en juego sus propiedades termodinámicas o cuestiones económicas y de eficiencia energética para minimizar el coste global, sino que también influyen sus características medioambientales y de seguridad: los refrigerantes tienen un Potencial de Agotamiento de la capa de ozono y un Potencial de Calentamiento Atmosférico, también tienen un límite de toxicidad y otro de inflamabilidad.

También se puede afirmar que los refrigerantes artificiales (CFC, HCFC o HFC) son los más perjudiciales para el medio ambiente, mientras que, como es lógico, los refrigerantes naturales tienen un impacto mínimo.

En cuanto a la protección del medio ambiente, es y será un asunto de máxima prioridad a nivel mundial. A raíz de la actividad humana, el planeta se ha visto amenazado en las últimas décadas por dos graves amenazas: el agotamiento de la capa de ozono y el calentamiento atmosférico. Ya sea con una importancia más o menos significativa, los refrigerantes y la actividad frigorífica en general tienen su responsabilidad en estos asuntos.

La solución tomada para llevar a cabo esta protección ha sido sustituir los gases refrigerantes utilizados hasta el momento por unos nuevos compuestos que tuviesen un menor impacto.

Estos nuevos gases, los A2L, presentan infinidad de ventajas para combatir el calentamiento global y el agotamiento de la capa de ozono pero presentan el inconveniente de ser inflamables.

Como hemos comentado en este texto, siguiendo una serie de recomendaciones de seguridad, formando a los trabajadores y utilizando equipos revisados y homologados la peligrosidad disminuye considerablemente. Es por esto que cada vez son más comunes las instalaciones con A2L. Todo encaminado a un futuro con unas emisiones cada vez menores.

Otro aspecto importante que debe ser comentado de este texto es el apartado económico.

Dentro de este trabajo se han mencionado varias cifras referentes a los precios de los equipos, de los refrigerantes, de las tasas... Ninguno de ellos beneficia a los A2L. Esta podría ser su principal característica. Mas restrictiva aún que la seguridad.

La cuestión es que las normativas cada vez son más restrictivas con las emisiones y la contaminación. Esto obliga a realizar una gran inversión en

equipos y refrigerantes de nuevas generaciones para estar preparados para las nuevas legislaciones en años venideros.

Lo llamamos inversión, porque aunque a priori económicamente no merezca la pena el cambio, en unos años este cambio que ahora es opcional será obligatorio y se elige ahora la opción de menor coste, R134a, antes de poder amortizar la inversión se tendrá que realizar otra y de mayor envergadura.

Y por último, las eficiencias. Se ha demostrado también que el R1234ZE no posee características muy superiores al R134a. Pero en comparación con las emisiones, este segundo aspecto tiene un mayor peso a la hora de tomar una decisión.

Por todo esto la elección de una instalación de refrigeración con A2L es la mejor opción ahora mismo. Estos refrigerantes son ligeramente inflamables pero siguiendo un procedimiento de trabajo estricto limitas los riesgos, las emisiones del sistema son muy inferiores a los sistemas actuales, permitiendo que estos sistemas se puedan seguir utilizando aun cuando las normativas sean más restrictivas. Como único punto negativo la inversión inicial, pero como hemos comentado es mejor invertir ahora en A2L que no en un refrigerante convencional y en pocos años volver a invertir en A2L.

6. Bibliografía

1. CALM, J. M. The next generation of refrigerants – Historical review, considerations, and outlook. En: International Journal of Refrigeration. 2008, no 31, pp. 1123-1133.
2. REGLAMENTO (CEE) Ng 3322/88 DEL CONSEJO de 14 de octubre de 1988 sobre determinados clorofluorocarbonos y halones que agotan la capa de ozono. 1988.
3. Carrier Air Conditioning Company, Handbook of Air Conditioning System Desing. New York, USA: McGRAW-HILL, 1970.
4. WILBERT F. STOECKER. Industrial refrigeration handbook. New York: McGraw-Hill, 1998. ISBN: 007061623X
5. ERNESTO RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ. Los Refrigerantes en las Instalaciones Frigoríficas. Madrid: Thomson Paraninfo, 2005. ISBN: 84-283-2890-0.
6. Normas ISO 817, Refrigerantes. Designación y clasificación de seguridad, 27/12/2019.
7. ASHRAE. Designation and Safety Classification of Refrigerants. Atlanta, USA. 2019.
8. Método de ensayo estándar para la concentración de límites de inflamabilidad de productos químicos (vapores y gases) (2002), referida en el estándar ASHRAE 34/ISO 817.
9. REGLAMENTO (UE) No 517/2014 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 16 de abril de 2014 sobre los gases fluorados de efecto invernadero y por el que se deroga el Reglamento (CE) no 842/2006.
10. Real Decreto 115/2017, de 17 de febrero, por el que se regula la comercialización y manipulación de gases fluorados y equipos basados en los mismos, así como la certificación de los profesionales que los utilizan y por el que se establecen los requisitos técnicos para las instalaciones que desarrollen actividades que emitan gases fluorados. Madrid, España. 2017.
11. Reglamento (CE) nº 1516/2007 de la Comisión, de 19 de diciembre de 2007, por el que se establecen, de conformidad con el Reglamento (CE) nº 842/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo, requisitos de control de fugas estándar para los equipos fijos de refrigeración, aires acondicionado y bombas de calor que contengan determinados gases fluorados de efecto invernadero.
12. Acuerdo europeo relativo al transporte internacional de mercancías peligrosas por carretera (ADR), del 30 de septiembre de 1957.

13. Instituto de Aire Acondicionado, Calefacción y Refrigeración (AHRI, por sus siglas en inglés)
14. MOTA-BABILONI, A. NAVARRO-ESBRÍ, J. BARRAGÁN, A. MOLÉS, F. AND PERIS, B. "Drop-in energy performance evaluation of r1234yf and r1234ze(e) in a vapor compression system as r134a replacements," Applied Thermal Engineering, vol. 71, no. 1, pp. 259–265, 2014.
15. CHICOTE, M. A. Presentación LECCIÓN1 Psicometría, Universidad de Valladolid

7. Anexos



TGF David Jorqui Martínez

Prepared For: David Jorqui Martinez

Prepared By: David Jorqui Martinez

E-mail: david.jorqui@outlook.es

Chiller Economic Summary

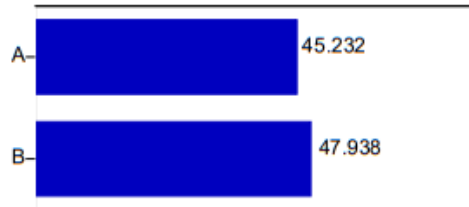
Project: TGF David Jorqui Martínez
Prepared By: Carrier

11/29/2022
10:58

1. Executive Summary

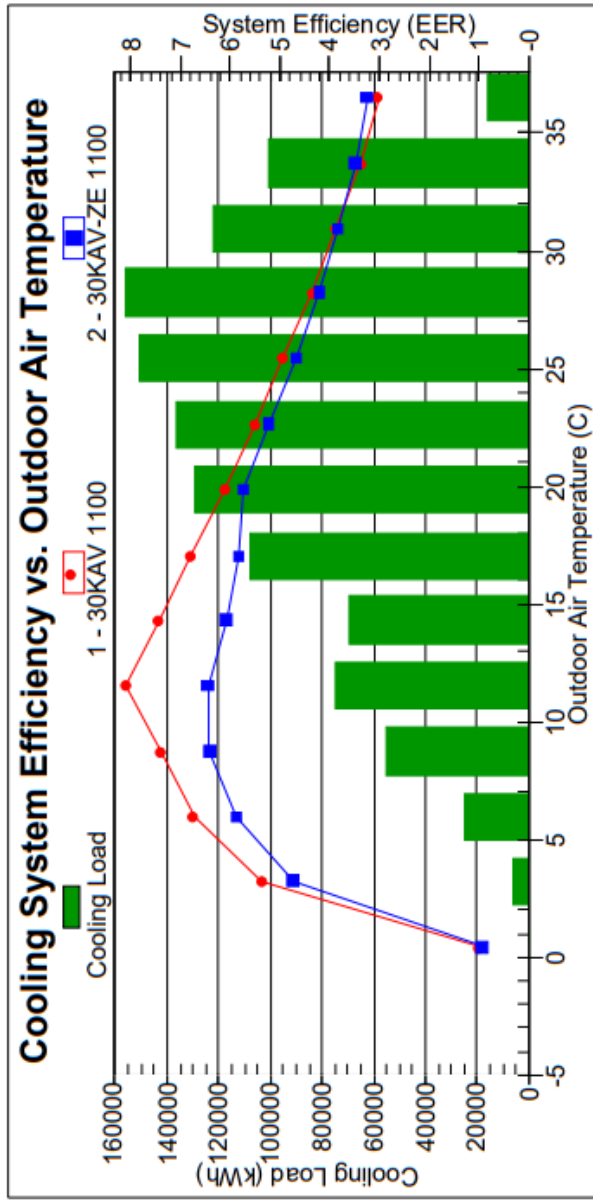
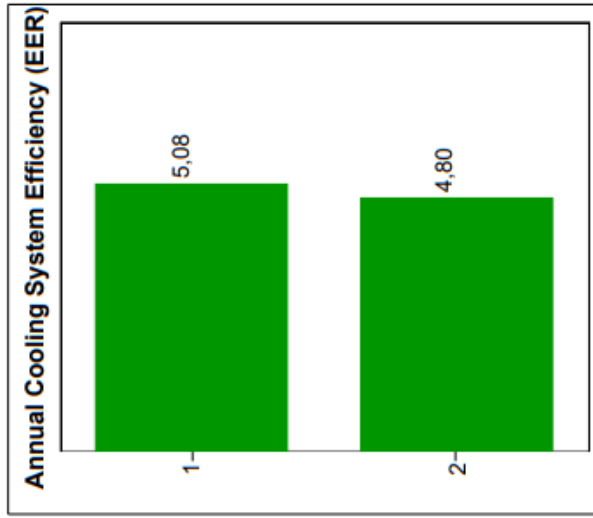
Economic Criteria	Best System Design for Each Criteria	Value(€)
Lowest Annual Energy Cost	(A) 30KAV 1100	45.232

Energy + Fuel Costs (€)



2. Cost and Energy Use Details

	(A) 30KAV 1100	(B) 30KAV-ZE 1100	Savings	Percent Savings
Annual Energy Cost Details				
Chiller Electric Cost (€)	41.988	44.670	(2.682)	-6%
Chiller Fuel Cost (€)	0	0	0	0%
Heat Rejection Fans (€)	0	0	0	0%
Chilled Water Pump (€)	3.244	3.268	(24)	-1%
Condenser Water Pump (€)	0	0	0	0%
Total Energy Cost (€)	45.232	47.938	(2.706)	-6%
Annual Energy Use Details				
Chillers (kWh/yr)	209.940	223.352	(13.412)	-6%
Heat Rejection Fans (kWh/yr)	0	0	0	0%
Chiller Water Pumps (kWh/yr)	16.220	16.339	(118)	-1%
Condenser Water Pumps (kWh/yr)	0	0	0	0%
Total Electric (kWh/yr)	226.161	239.691	(13.531)	-6%
Total Natural Gas Use (kWh)	0	0	0	0%
Total Steam Use (kWh)	0	0	0	0%



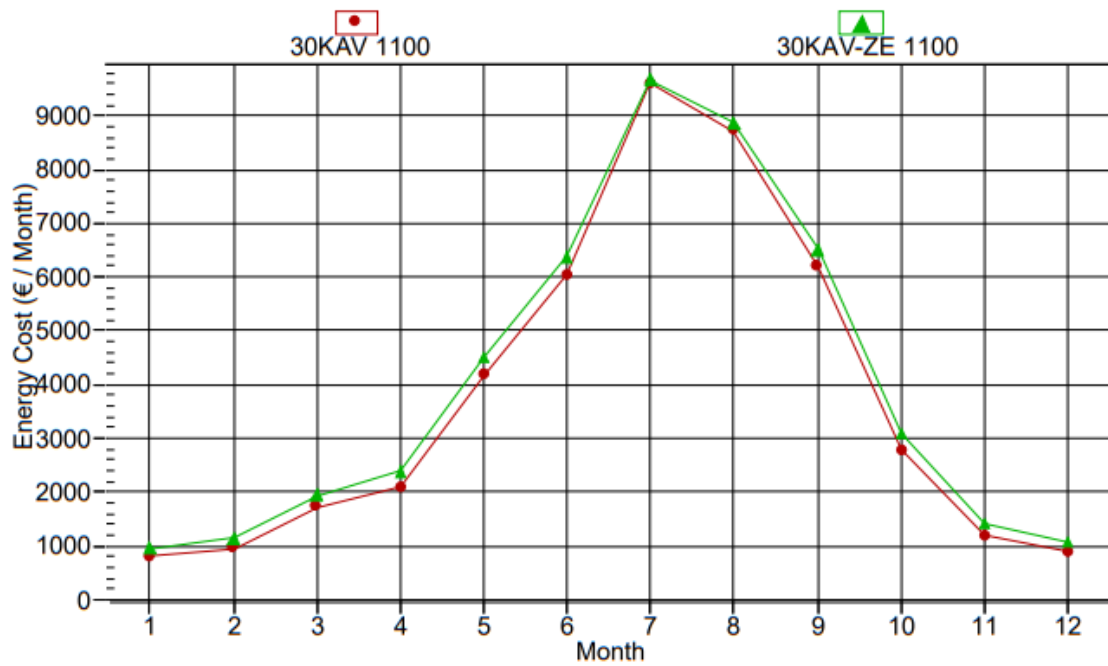
1. Annual Cooling System Efficiency

Chiller System	Cooling System Efficiency (EER)	Cooling Load (kWh)	Energy Use for Chiller Electric Cooling (kWh)	Chiller Fuel Use (kWh)	Chilled Water Pumps (kWh)	Condenser Water Pumps (kWh)	Heat Rejection Fans (kWh)
1 - 30KAV 1100	5.08	1,149,667	226,161	209,940	0	16,220	0
2 - 30KAV-ZE 1100	4.80	1,149,667	239,691	223,352	0	16,339	0
Annual Cooling System Efficiency in EER = (Cooling System Load in kWh) / (Total Cooling Energy Use in kWh)							

Energy Costs by Month

Project: TGF David Jorqui Martínez
Prepared By: Carrier

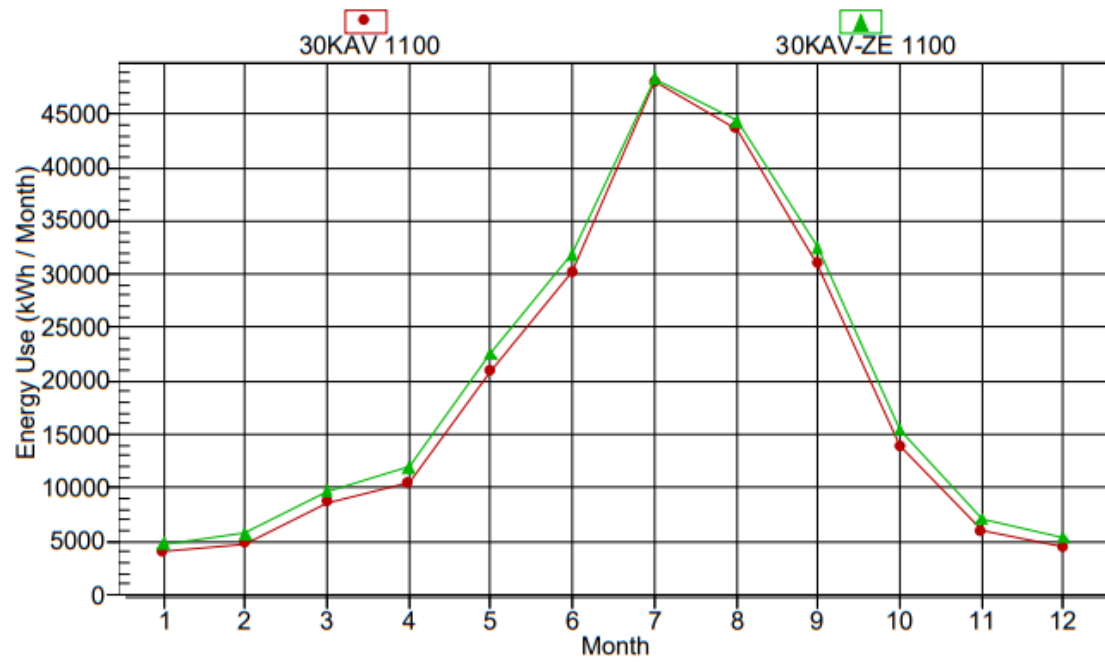
11/29/2022
10:58



Electrical Energy Use by Month

Project: TGF David Jorqui Martínez
Prepared By: Carrier

11/29/2022
10:58



Energy Cost Details

Project: TGF David Jorqui Martínez
Prepared By: Carrier

11/29/2022
10:58

1. Energy Cost Details: [30KAV 1100]

Month	Electric Energy Use (kWh)	Electrical Energy Cost (€)	Electric Demand (kW)	Electric Demand Cost (€)	Total Electric Cost (€)	Natural Gas Costs (€)	Steam Costs (€)	Total Energy Cost (€)
Jan	4.016	803	26,9	0	803	0	0	803
Feb	4.771	954	44,2	0	954	0	0	954
Mar	8.633	1.727	121,6	0	1.727	0	0	1.727
Apr	10.540	2.108	121,6	0	2.108	0	0	2.108
May	20.871	4.174	205,9	0	4.174	0	0	4.174
Jun	30.260	6.052	205,9	0	6.052	0	0	6.052
Jul	48.113	9.623	331,1	0	9.623	0	0	9.623
Aug	43.650	8.730	331,1	0	8.730	0	0	8.730
Sep	30.988	6.198	268,5	0	6.198	0	0	6.198
Oct	13.886	2.777	161,1	0	2.777	0	0	2.777
Nov	5.923	1.185	44,2	0	1.185	0	0	1.185
Dec	4.510	902	26,9	0	902	0	0	902
Total	226.161	45.232	-	0	45.232	0	0	45.232

2. Energy Cost Details: [30KAV-ZE 1100]

Month	Electric Energy Use (kWh)	Electrical Energy Cost (€)	Electric Demand (kW)	Electric Demand Cost (€)	Total Electric Cost (€)	Natural Gas Costs (€)	Steam Costs (€)	Total Energy Cost (€)
Jan	4.773	955	32,9	0	955	0	0	955
Feb	5.705	1.141	51,5	0	1.141	0	0	1.141
Mar	9.730	1.946	128,6	0	1.946	0	0	1.946
Apr	11.929	2.386	128,6	0	2.386	0	0	2.386
May	22.515	4.503	209,3	0	4.503	0	0	4.503
Jun	31.875	6.375	209,3	0	6.375	0	0	6.375
Jul	48.368	9.674	307,2	0	9.674	0	0	9.674
Aug	44.320	8.864	307,2	0	8.864	0	0	8.864
Sep	32.517	6.503	258,4	0	6.503	0	0	6.503
Oct	15.471	3.094	166,3	0	3.094	0	0	3.094
Nov	7.118	1.424	51,5	0	1.424	0	0	1.424
Dec	5.371	1.074	32,9	0	1.074	0	0	1.074
Total	239.691	47.938	-	0	47.938	0	0	47.938

Energy Use Details

Project: TGF David Jorqui Martínez
Prepared By: Carrier

11/29/2022
10:58

1. Energy Use Details: [30KAV 1100]

Month	Total System Cooling Load (kWh)	Chillers (kWh)	Chilled Water Pumps (kWh)	Condenser Water Pumps (kWh)	Heat Rejection Fans (kWh)	Total Cooling Electric Energy (kWh)	Generator Heat Input - Natural Gas (kWh)	Generator Heat Input - Steam (kWh)
Jan	29.322	3.086	930	0	0	4.016	0	0
Feb	35.237	3.842	930	0	0	4.771	0	0
Mar	55.361	7.546	1.087	0	0	8.633	0	0
Apr	69.153	9.481	1.059	0	0	10.540	0	0
May	114.180	19.591	1.280	0	0	20.871	0	0
Jun	151.361	28.706	1.555	0	0	30.260	0	0
Jul	196.700	45.700	2.413	0	0	48.113	0	0
Aug	184.322	41.458	2.192	0	0	43.650	0	0
Sep	149.594	29.349	1.640	0	0	30.988	0	0
Oct	87.506	12.811	1.075	0	0	13.886	0	0
Nov	44.225	4.906	1.017	0	0	5.923	0	0
Dec	32.706	3.466	1.045	0	0	4.510	0	0
Total	1.149.667	209.940	16.220	0	0	226.161	0	0

2. Energy Use Details: [30KAV-ZE 1100]

Month	Total System Cooling Load (kWh)	Chillers (kWh)	Chilled Water Pumps (kWh)	Condenser Water Pumps (kWh)	Heat Rejection Fans (kWh)	Total Cooling Electric Energy (kWh)	Generator Heat Input - Natural Gas (kWh)	Generator Heat Input - Steam (kWh)
Jan	29.322	3.785	988	0	0	4.773	0	0
Feb	35.237	4.717	988	0	0	5.705	0	0
Mar	55.361	8.587	1.144	0	0	9.730	0	0
Apr	69.153	10.816	1.113	0	0	11.929	0	0
May	114.180	21.220	1.296	0	0	22.515	0	0
Jun	151.361	30.344	1.531	0	0	31.875	0	0
Jul	196.700	46.088	2.280	0	0	48.368	0	0
Aug	184.322	42.237	2.083	0	0	44.320	0	0
Sep	149.594	30.911	1.606	0	0	32.517	0	0
Oct	87.506	14.350	1.121	0	0	15.471	0	0
Nov	44.225	6.037	1.080	0	0	7.118	0	0
Dec	32.706	4.261	1.110	0	0	5.371	0	0
Total	1.149.667	223.352	16.339	0	0	239.691	0	0

Input Data Summary Report

Project: TGF David Jorqui Martínez
Prepared By: Carrier

11/29/2022
10:58

1. Input Data Summary

Weather

City Madrid, Spain
Operating Calendar Full Year
Operating Schedule 0700-1900: Weekday
..... 0700-1400: Saturday
..... Off All Day: Sunday

Loads (Cooling)

Peak Building Load 1.000 kW at 36,4 C
Building Load #2 200 kW at 14,2 C
Building Load #3 0 kW at 0,0 C
Outdoor Economizer Used No

Analysis Parameters

Type of Analysis Energy Costs Only
Include Pump Energy Use Yes
Include Heat Rejection Fan Energy Use Yes

Chiller Systems

(A) 30KAV 1100
(B) 30KAV-ZE 1100

Economics

Lifecycle Period 25 years
Minimum Attractive Rate of Return 0 %
Electric Energy 0,200 €/kWh
Electric Demand 0,000 €/kW
Natural Gas 0,000 €/kWh
Steam 0,000 €/kWh