

Trabajo de Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales  
Mención Energética

Fluidos Refrigerantes: Análisis de la Situación  
Actual

Autor: Pablo Enrique Rodríguez de Arriba

Tutor: Juan Francisco Coronel Toro

Dep. de Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018





Trabajo de Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales  
Mención Energética

# **Fluidos Refrigerantes: Análisis de la Situación Actual**

Autor:

Pablo Enrique Rodríguez de Arriba

Tutor:

Juan Francisco Coronel Toro

Profesor titular

Dep. de Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018



Trabajo de Fin de Grado: Fluidos Refrigerantes: Análisis de la Situación Actual

Autor: Pablo Enrique Rodríguez de Arriba

Tutor: Juan Francisco Coronel Toro

El tribunal nombrado para juzgar el Trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal

*A mi familia*

*A mis maestros*





# Agradecimientos

---

En primer lugar, agradecer a Don Juan Francisco Coronel Toro por aceptar tutelarme este trabajo, así como por su ayuda y orientación durante el desarrollo del mismo.

Muchas gracias a mi familia, pareja y amigos por el apoyo de todos estos años.

*Pablo Enrique Rodríguez de Arriba*

*Sevilla, 2018*



El presente Trabajo Fin de Grado tiene dos objetivos. Por un lado, se va a describir con detalla la problemática actual que afecta a los fluidos refrigerantes usados hoy en día. Por otro, se van a analizar los límites impuestos por el Reglamento de Seguridad de las Instalaciones Frigoríficas, en adelante RSIF, a los refrigerantes tradicionales y alternativos. Además, como en el mes de abril de 2018 se hizo público el proyecto de real decreto que pretende aprobar un nuevo RSIF a finales de dicho año, se van a comparar estos resultados con los que se obtendrían de aplicar el nuevo Reglamento.

Este trabajo se justificada dada la importancia incuestionable de la tecnología frigorífica en la sociedad. Esta rama de la ingeniería se divide en tres campos de aplicación principales: la refrigeración, la climatización y las bombas de calor. A su vez, cada uno de estos campos tienen sus propias ramificaciones siendo los objetivos clásicos la conservación de alimentos, el confort humano y la refrigeración de procesos industriales. Los refrigerantes son el elemento indispensable de estos sistemas.

En una instalación frigorífica existen dos tipos de refrigerantes. Los refrigerantes primarios o frigorígenos son los que circulan por el circuito frigorífico, transfiriendo calor mediante cambio de fase. Los refrigerantes secundarios o frigorífenos son enfriados, o calentados en el caso de bombas de calor, por el refrigerante primario para transportar ese calor al medio a enfriar o calentar. Cuando en este trabajo hablemos de refrigerantes nos estaremos refiriendo siempre a los refrigerantes frigorígenos, mientras que a los refrigerantes frigorífenos los llamaremos refrigerantes secundarios.

The American Society of Heating, Refrigeration, Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) creó en su Standard 34 de 1997 la denominación alfanumérica de los refrigerantes usada a nivel mundial. En general, los refrigerantes también pueden nombrarse usando su fórmula química o su nombre químico. Por su parte, el nombre comercial nunca puede considerarse suficiente para determinar un refrigerante.

Entre los fluidos refrigerantes encontramos refrigerantes naturales como el amoníaco, el dióxido de carbono o los hidrocarburos, y también compuestos sintéticos a base de carbono, flúor, hidrógeno y cloro como los CFC, los HCFC, los HFC o las más recientes HFO. Además, pueden realizarse mezclas de refrigerantes que permiten tener un refrigerante con unas propiedades determinadas. La mezcla se considera azeotrópica si, en un rango de operación, el cambio de fase ocurre a temperatura prácticamente constante o no azeotrópica si existe una diferencia de temperatura entre las temperaturas de saturación de los componentes de la mezcla.

Las propiedades de los refrigerantes son medioambientales, de seguridad, termodinámicas o económicas.

En cuanto a las propiedades medioambientales en los últimos años se han detectado algunos problemas medioambientales provocados por las emisiones de los refrigerantes. Nos referimos al agotamiento de la capa de ozono y al calentamiento atmosférico. Para cuantificar ambos fenómenos existen unos indicadores:

- El Potencial de Agotamiento de Ozono (PAO u ODP en inglés) que toma como referencia el efecto producido por el CFC R-11 al que se le asigna el valor 1.
- El Potencial de Calentamiento Atmosférico (PCA o GWP en inglés) que se define como el potencial de calentamiento climático en 100 años respecto al efecto que tendría 1 kg de CO<sub>2</sub>.

Con respecto al calentamiento atmosférico un sistema frigorífico contribuye por efectos directos e indirectos. El efecto directo se debe, por un lado, a las fugas de refrigerantes que ocurren durante la operación normal de la instalación debido a que ésta se encuentra a una presión mayor que la atmosférica y, por otro, a las emisiones de refrigerante que ocurren durante la recuperación del gas al final de su vida útil. El efecto indirecto se debe al consumo de energía eléctrica del compresor que en última instancia es generada mediante la combustión de combustibles fósiles que también contribuye al calentamiento global.

El TEWI o impacto total equivalente sobre el calentamiento atmosférico es un parámetro que aúna tanto los

efectos directos como los indirectos, se calcula con la siguiente ecuación:

$$TEWI = PCA \cdot L \cdot n + PCA \cdot m \cdot (1 - \alpha_{recuperación}) + n \cdot E_{anual} \cdot \beta \quad (I)$$

La carga de refrigerante  $m$  y la vida útil  $n$  son datos intrínsecos a la propia instalación. El PCA depende únicamente del refrigerante utilizado. El consumo eléctrico anual  $E_{anual}$  depende del rendimiento del ciclo. El factor de emisión  $\beta$  es intrínseco del sistema eléctrico, estimándose en 0.331 kg CO<sub>2</sub> por kWh para la red española. El factor de recuperación  $\alpha_{recuperación}$  se encuentra entre 0 y 1, se puede estimar un valor de 0.95. El factor de fugas  $L$  dependen del tamaño de la instalación, pueden aproximarse como  $0.4 \cdot m^{2/3}$

El rendimiento de los ciclos frigoríficos se evalúa a través del coeficiente de eficiencia energética COP. Se define como la potencia que produce el efecto útil entre la potencia aportada en el compresor. Cuanto mayor sea el COP para una misma aplicación, es decir, mismo efecto útil, menor será el consumo de la instalación. El COP no solo depende de las temperaturas de operación o del ciclo frigorífico implementado, sino que es función intrínseca del fluido refrigerante. Se han realizado varias simulaciones en EES para comparar cualitativamente el COP de los refrigerantes más utilizados. Los refrigerantes analizados han sido R-11, R-22, R-134a, R-410A, R-32, R-1234yf, R-717 y R-600a. Se han realizado cuatro gráficas: en la primera, se ha representado el COP fijando la temperatura de condensación en 40°C y variando la temperatura de evaporación. En la segunda, se ha representado el COP fijando la temperatura de evaporación en 0°C y variando la temperatura de condensación. En la tercera y la cuarta se ha representado el cociente entre el COP y el COP de Carnot para los mismos supuestos anteriores. En todos los casos se ha supuesto un ciclo sin subenfriamiento ni sobrecalentamiento con compresión isentrópica.

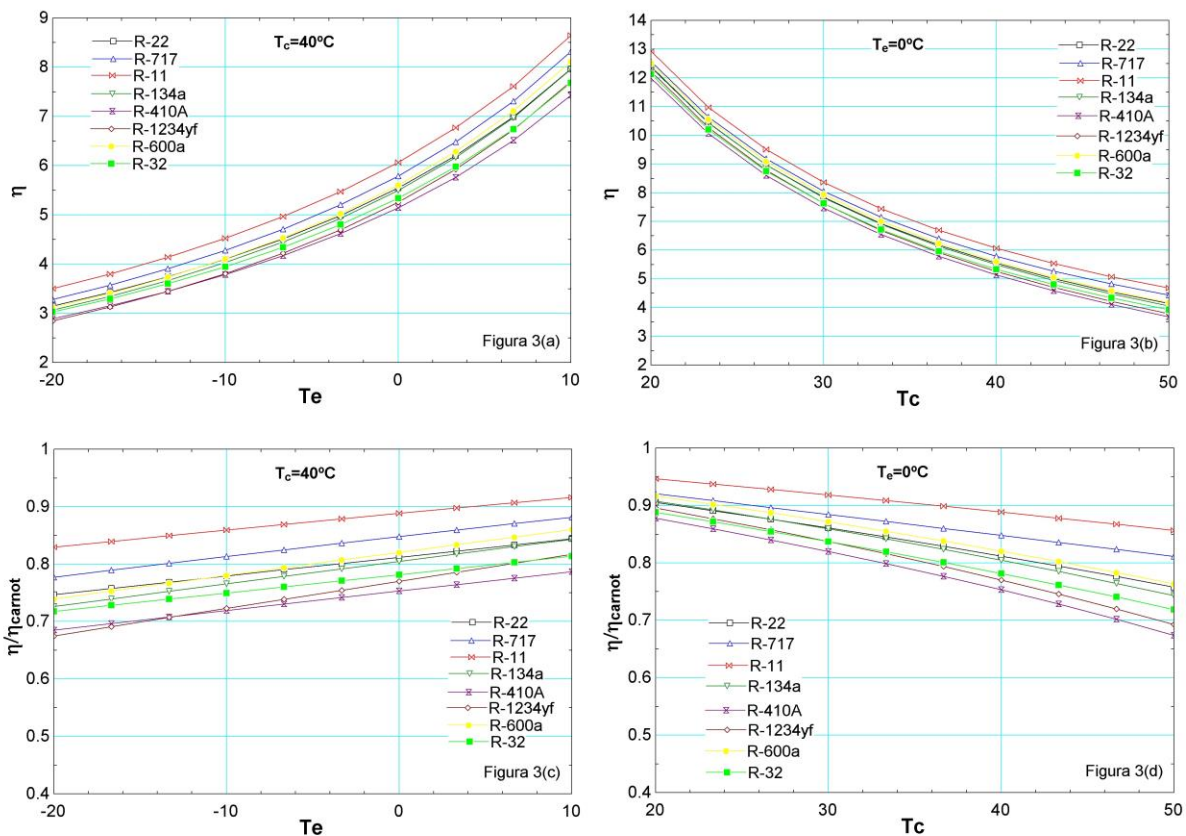


Figura I. COP para distintos refrigerantes en un ciclo con compresión isentrópica sin subenfriamiento ni sobrecalentamiento: (a) variando  $T_e$  fijando  $T_c = 40^\circ\text{C}$ ; (b) variando  $T_c$  fijando  $T_e = 0^\circ\text{C}$ ; (c) y (d) idénticos a los casos anteriores, pero representando el cociente COP entre COP<sub>Carnot</sub>

Se observa que el rendimiento aumenta siempre que se acercan las temperaturas de evaporación y condensación. El máximo rendimiento lo da el ya prohibido R-11, seguido por el amoníaco R-717. El resto de sustancias dan rendimientos muy similares por lo que se puede conseguir que un equipo funcione con el mismo COP al cambiar su refrigerante si se ajustan las características del ciclo, como podría ser disminuir el

salto de temperaturas.

En cuanto a sus características de seguridad, los refrigerantes al igual que el resto de fluidos térmicos pueden ser tóxicos e inflamables. La toxicidad es la característica que lo hace dañino o letal para las personas o dificulta su capacidad de escapar debido a una exposición intensa o prolongada por inhalación de los mismos. Se cuantifica a través del límite de exposición de toxicidad aguda (LETA/ATEL). La inflamabilidad es la capacidad de un refrigerante para propagar una llama desde una fuente de ignición. Se define a través del límite inferior de inflamabilidad (LII), que es la concentración mínima de refrigerante que es capaz de propagar una llama en una mezcla homogénea de aire y refrigerante, y la temperatura de autoignición, que es la temperatura por encima de la cual el refrigerante puede prender sin presencia de llama. A estos dos parámetros hay que añadir un tercero, el desplazamiento de oxígeno. El límite de anoxia (ODL) es la concentración de refrigerante que provoca un desplazamiento de oxígeno en el ambiente tal que la concentración del mismo haya disminuido hasta un valor cercano al 18%, impidiendo que pueda realizarse la respiración normal.

La seguridad de un refrigerante puede medirse de forma sencilla a través de algunos parámetros que combinan los conceptos anteriores. El límite de concentración de refrigerante (RCL) se define como la concentración máxima de refrigerante admisible en el aire que evita que haya riesgo de toxicidad aguda, asfixia por falta de oxígeno y peligro de inflamabilidad y se calcula como el mínimo entre el LETA, ODL y un 20% del LII. El límite práctico (LP) se define como la concentración de refrigerante en un local que no reduce la capacidad de escapar de los ocupantes y no genera un riesgo de ignición. El LP coincide normalmente con el valor del RCL, aunque en otras ocasiones se emplean valores históricos. En la norma UNE-EN 378:2016 aparecen dos nuevos factores que tienen en cuenta el efecto de la ventilación. El QLMV o carga límite con ventilación mínima es la concentración de refrigerante que daría lugar a una concentración igual al RCL en un recinto no hermético en el que existe una fuga elevada de refrigerante (10 kg/h, o 2.78 g/s), considerando una abertura de 0.0032 m<sup>2</sup>. Esta abertura corresponde a una puerta de 0.8 m de anchos y una separación de 4 mm. Por su parte, el QLAV o carga límite con ventilación adicional es la concentración de refrigerante que, de liberarse toda la carga de refrigerante en el local, crearía un ambiente de peligro. Se determina como el menor entre el ODL y el 50% del LII, excepto el R-744 (CO<sub>2</sub>) que se termina para una concentración del 10%.

Las propiedades termodinámicas de los refrigerantes se resumen en las siguientes características:

- Presión de evaporación y condensación. En general, las temperaturas de evaporación y condensación están fijadas por la aplicación. Interesa aquel refrigerante que tenga las presiones de saturación más bajas, aunque siempre superiores a la atmosférica para evitar la entrada de aire, pues eso facilita el diseño mecánico de las válvulas y tuberías.
- Miscibilidad con el aceite lubricante.
- Reactividad con los materiales de la instalación.
- Capacidad frigorífica.
- Conductividad térmica.
- Detección de fugas.

Por último, el coste de los refrigerantes puede ser un factor determinante para elegir un refrigerante frente a otro. Se han consultado distintas páginas webs de proveedores de refrigerantes para intentar estimar su precio. Desafortunadamente, la mayoría de distribuidores no muestran el precio en sus catálogos, existiendo una gran diversidad de precios entre los que sí. Se ha optado por mostrar los precios de algunos refrigerantes extraídos del catálogo disponible en la web de Pecomark (2018). Se observa que los refrigerantes naturales como el dióxido de carbono, el amoníaco o los hidrocarburos es mucho menor que el de los refrigerantes sintéticos. Para estos últimos el precio aumenta con el PCA, que también se muestra en la Tabla I. En cuanto al HFO R-1234ze(E), a pesar de tener un potencial de calentamiento atmosférico despreciable, tienen un precio bastante elevado debido a que son compuestos sintéticos fabricados en un laboratorio.

Tabla I. Precio de los distintos refrigerantes [Fuente: Pecomark]

Refrigerante	Precio promedio	PCA
R-134a	106 €/kg	1430
R-410A	154 €/kg	2088
R-404A	238 €/kg	3922
R-407C	145 €/kg	1744
R-32	70 €/kg	675
R-1234ze(E)	72 €/kg	7
R-600a	33 €/kg	3
R-290	44 €/kg	3

Se concluye que no existe el refrigerante perfecto ni tan si quiera para una aplicación determinada. Cuando se trata de escoger un refrigerante no solo entran en juego sus propiedades termodinámicas o cuestiones económicas o de eficiencia energética, también influyen sus características medioambientales y de seguridad. Paradójicamente, los refrigerantes menos contaminantes suelen ser también los menos seguros.

Ningún refrigerante se ha asentado de forma definitiva en alguna aplicación concreta, con excepción quizás del amoníaco en la industria, desde que la historia de la tecnología frigorífica comenzó hace dos siglos. La primera definición de refrigerante la dio Oliver Evans en 1805. Él se percató de que a bajas presiones el punto de ebullición del dietiléter disminuía por debajo de la temperatura ambiente, permitiendo productor frío con su evaporación. En 1834, Jacob Perkins describió un ciclo de compresión mecánica simple y a los refrigerantes en su patente: “fluido volátil con el propósito de producir frío y, a la vez, condensar para poder ser reutilizado”.

Entre 1830 y 1930 las sustancias usadas como refrigerantes fueron fluidos naturales, muy conocidos, con una alta volatilidad como el amoníaco, el agua, el dióxido de carbono, el dióxido de azufre, el ácido fórmico o hidrocarburos como el propano o el isobutano. Todas estas sustancias, con excepción del agua que presenta dificultades tecnológicas, son tóxicas, inflamables o ambas. Algunas incluso eran altamente reactivas (como el ácido fórmico). Por esta razón, los accidentes estaban al orden del día. La inseguridad era tal que, como cuenta anecdóticamente Calm (2008), un anuncio de 1922 describía al propano como la alternativa segura e inodora del amoníaco a pesar de que hoy en día se encuentra clasificado dentro del grupo de baja seguridad debido a su alta inflamabilidad, mientras que el amoníaco es de seguridad media.

En 1924, Willis Carrier y R. W. Waterfill llevaron a cabo el primer análisis comparativo de refrigerantes para una enfriadora de agua, concluyendo que el 1,2-dicloroetileno era la sustancia más adecuada. Se descartó el CO<sub>2</sub>, sin estudiar los ciclos transcíticos, porque producían un mal rendimiento. También el amoníaco y el agua porque necesitaban muchas etapas de compresión. Se rechazó el SO<sub>2</sub> por razones de seguridad y el tetracloruro de carbono (R-10) por su reactividad con los metales [Calm, 2008]. Comenzaba así la búsqueda del refrigerante definitivo.

La industria de la ingeniería frigorífica necesitaba de un refrigerante que no fuera tóxico ni inflamable y con las características adecuada si quería extenderse a otros sectores, como el doméstico, y alcanzar la importancia en la sociedad que tiene hoy en día. Con este propósito, Midgley y Henne buscaron los compuestos más convenientes para ser usados como refrigerantes. Buscaban aquellas sustancias con un bajo punto de ebullición, nula reactividad y baja toxicidad e inflamabilidad. Concluyeron que el compuesto buscado debía estar formado por alguno de los siguientes elementos: carbono, oxígeno, nitrógeno, hidrógeno, sulfuro, bromo, cloro o flúor. Se dieron cuenta de que los refrigerantes utilizados hasta entonces tenían estos elementos, excepto uno: el flúor. En 1930, publicaron su estudio de cómo afectaba el cloro y el flúor en los compuestos orgánicos a su volatilidad, toxicidad e inflamabilidad [Calm, 2008].

Un año después se comercializó el primer refrigerante seguro, el R-12, mientras que el R-11 llegó en 1932. A diferencia de sus predecesores, los CFC, y en la década de los 50 los HCFC, sí consiguieron llegar al mercado doméstico [Calm, 2008]. En los frigoríficos domésticos y para la climatización de los vehículos se empleó R-12, mientras que en la industria destacaron el R-22 y, como antes, el amoníaco. En sistemas de aire acondicionado doméstico también dominó el R-22. Por su parte, el R-502 (una mezcla a base del HCFC R-22 y del CFC R-115) se usaba ampliamente en el sector comercial [Stoecker, 1998].

En 1974, F. S. Rowland y Mario Molina postularon en su artículo “Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone” la teoría del agotamiento de la capa de ozono. En general, las moléculas de O<sub>3</sub> están sometidas a un proceso continuo e ininterrumpido de destrucción y regeneración, absorbiendo radiación ultravioleta en dicho proceso.



De esta forma, la capa de ozono es un filtro natural, pues nos protege de este tipo de radiación que puede causar cáncer de piel o ceguera, además de afectar negativamente a la vida vegetal y animal.

Según esta teoría, los CFC y, en menor medida, los HCFC son lo suficientemente estables como para llegar a la estratosfera sin reaccionar previamente con otras sustancias, como no ocurre con el cloro emitido de forma natural. En esta capa de la atmósfera las moléculas de CFC y HCFC se disocian dejando un átomo de cloro libre, el cual actúa de catalizador de una reacción fatídica con el ozono.



Se observa que el átomo de cloro destruye una molécula de ozono dando lugar a una de oxígeno y a otra de monóxido de cloro con un radical libre que, en contacto con un átomo de oxígeno, producen una molécula de oxígeno y renuevan el átomo de cloro, pudiéndose repetir el proceso, en teoría, de forma indefinida. Este proceso no solo elimina una molécula de ozono, sino que el átomo de oxígeno destruido impide la regeneración de otra molécula de ozono.

Las hipótesis de Rowland y Molina llevaron al descubrimiento del agujero de la capa de ozono en el polo sur en 1985. La respuesta internacional llegó en 1989, fecha en la que entró en vigor el Protocolo de Montreal. El objetivo de este acuerdo es conseguir la eliminación de las diferentes sustancias que agotan la capa de ozono, que se agrupaban en diferentes anexos. Se estableció un calendario distinto para los países más desarrollados, llamados Partes fuera del artículo 5, que para los países en vías de desarrollo (Partes del artículo 5).

Los CFC se encuentran en los anexos A y B. Su abandono se completó para las Partes fuera del artículo 5 en 1996 y en 2010 para las Partes del artículo 5. Consecuentemente, no se consumen estos refrigerantes en ningún lugar del mundo.

Los HCFC como el R-22 se encuentran en el anexo C. Su calendario de eliminación es más relajado porque estas sustancias tienen un PAO inferior al de los CFC y porque se escogieron como refrigerantes de transición hasta la actual generación de refrigerantes sin cloro. Para las Partes fuera del artículo 5 se estipularon reducciones del 35% para 2004, del 75% para 2010, del 90% para 2015 y del 100% para 2020. En el caso particular de los países de la Unión Europea se adelantó el abandono total de estas sustancias para 2010. Para las Partes del artículo 5 se programó una reducción del 10% para 2015, del 35% para 2020, del 67,5% para 2025 y del 100% para 2030.

La Figura II muestra la evolución del consumo de HCFC en el mundo a partir de datos de la UNEP (2018). Se observa un rápido crecimiento desde 1990 hasta 2004, puesto que se usaban como refrigerantes de sustitución. Se observa un primer descenso en 2004 cuando comienzan las reducciones en los países más desarrollados. El crecimiento posterior solo puede deberse a la actividad de los países del artículo 5. A partir de 2015 comienzan las reducciones en estos países. El valor de 2017 no puede ser tenido en cuenta puesto que en la fecha de consulta de estos datos tan solo 52 países habían reportado su consumo de HCFC de los 169 que lo hicieron en 2016.

Actualmente nos encontraríamos en niveles de consumo similares a los de 1995.

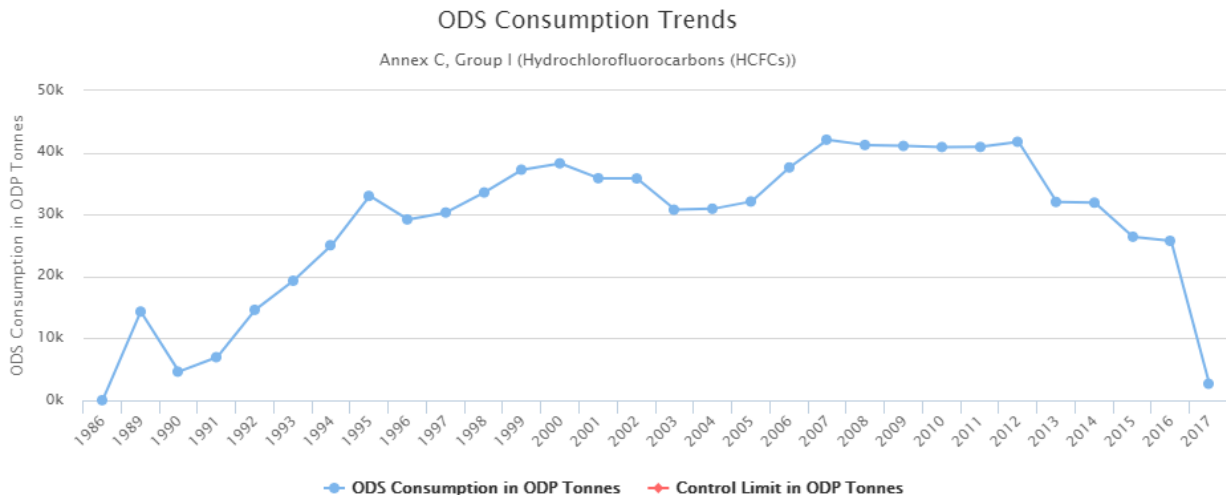


Figura II. Evolución de los HCFC consumidos a nivel mundial

En la Figura III se muestra tanto el consumo como la producción de HCFC en China en los últimos años. Se observa un crecimiento vertiginoso desde finales de siglo hasta 2010, que es cuando se calcula el nivel básico para las reducciones. El consumo de HCFC en 2016 fue de 14 000 t de ODP, lo que equivale a más del 50% del consumo global como se observa en la Figura II. Otra conclusión de la Figura III es que casi la totalidad de los HCFC consumidos en todo el mundo son producidos en China.

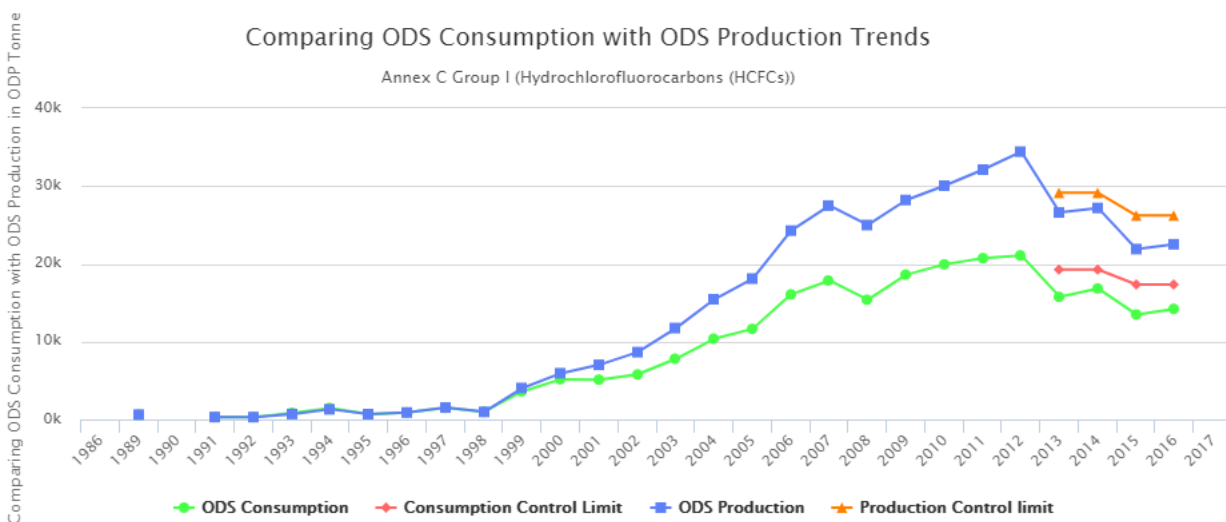


Figura III. Evolución del consumo y producción de HCFC en China

Se concluye que el abandono de HCFC está aún a medio camino porque, si bien es cierto que su fin tanto en la Unión Europea como en Estados Unidos es casi una realidad, estos dos bloques juntos solo significaban el 50% del consumo global de estas sustancias agotadoras de la capa de ozono con respecto a los valores máximos de 2010. Parece lógico que, en países en vías de desarrollo, con un consumo de HCFC inferior a las 1000 toneladas de ODP (PAO), puedan usarse estas sustancias hasta 2030 en aras de no dificultar su crecimiento y de darles un mayor margen para alcanzar el nivel tecnológico que puedan necesitar las futuras alternativas. No obstante, como se ha comentado, el consumo de HCFC de China representa más del 50% del de estos países, estando en siguiente lugar la República de Corea con un consumo un 90% inferior al primero. Por estas razones, parece que la desaparición de los HCFC va a ser más lenta y menos ecuánime de cómo debería haber ocurrido.

Desde 1990 el grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC en inglés) desarrolla informes de evaluación que intenta demostrar la relación existente entre el aumento de las temperaturas en nuestro planeta y las emisiones antropogénicas de ciertos gases llamados gases de efecto invernadero. Los principales gases de efecto invernadero son el vapor de agua, el CO<sub>2</sub>, el metano, el ozono y los óxidos de nitrógeno. Proceden principalmente de la quema de los combustibles fósiles y del uso de fertilizantes nitrogenados. El vapor de agua produce dos tercios del efecto invernadero natural, pero al ser un gas



condensable las emisiones que se hagan desde la Tierra no cambian su concentración en la atmósfera. Aun así, si tienen un efecto de retroalimentación del cambio climático pues la cantidad de agua en el aire aumenta con la temperatura.

El Protocolo de Kioto de 1997 incluyó dentro del conjunto de gases de efecto invernadero a controlar a los gases halogenados como los CFC, los HCFC y también los actuales HFC. Esto parece tener sentido si comparamos los potenciales de calentamiento atmosférico (PCA). Mientras que el PCA del metano es 25 o el del N<sub>2</sub>O es 265, el del CFC-12 era 10200, el del HCFC-22 1760 y el del HFC-134a es 1760. Es decir, son varios ordenes de magnitud mayor. Pero para comprender mejor el efecto real que tienen estos gases en el calentamiento atmosférico antropogénico hay que comparar las emisiones brutas. En la Figura IV se observan cómo han evolucionado las emisiones de los gases de efecto invernadero y puede compararse el peso relativo de cada uno de ellos al estar expresados en las mismas unidades (Gt de CO<sub>2</sub> equivalente). En 2010, la franja correspondiente a los gases fluorados (azul oscuro) equivalía a un 2% del total emitido, es decir, a unos 1000 Mt, de los cuales se estima que un 76% son HFC. El CO<sub>2</sub> es el gas de efecto invernadero más importante con un 65% procedente de combustibles fósiles y un 11% CO<sub>2</sub> debido a la silvicultura. Se observa que, aunque el PCA del metano sea 100 veces inferior al de los gases fluorados, su impacto es ocho veces mayor.

### Emisiones antropogénicas anuales totales de GEI por gases, 1970-2010

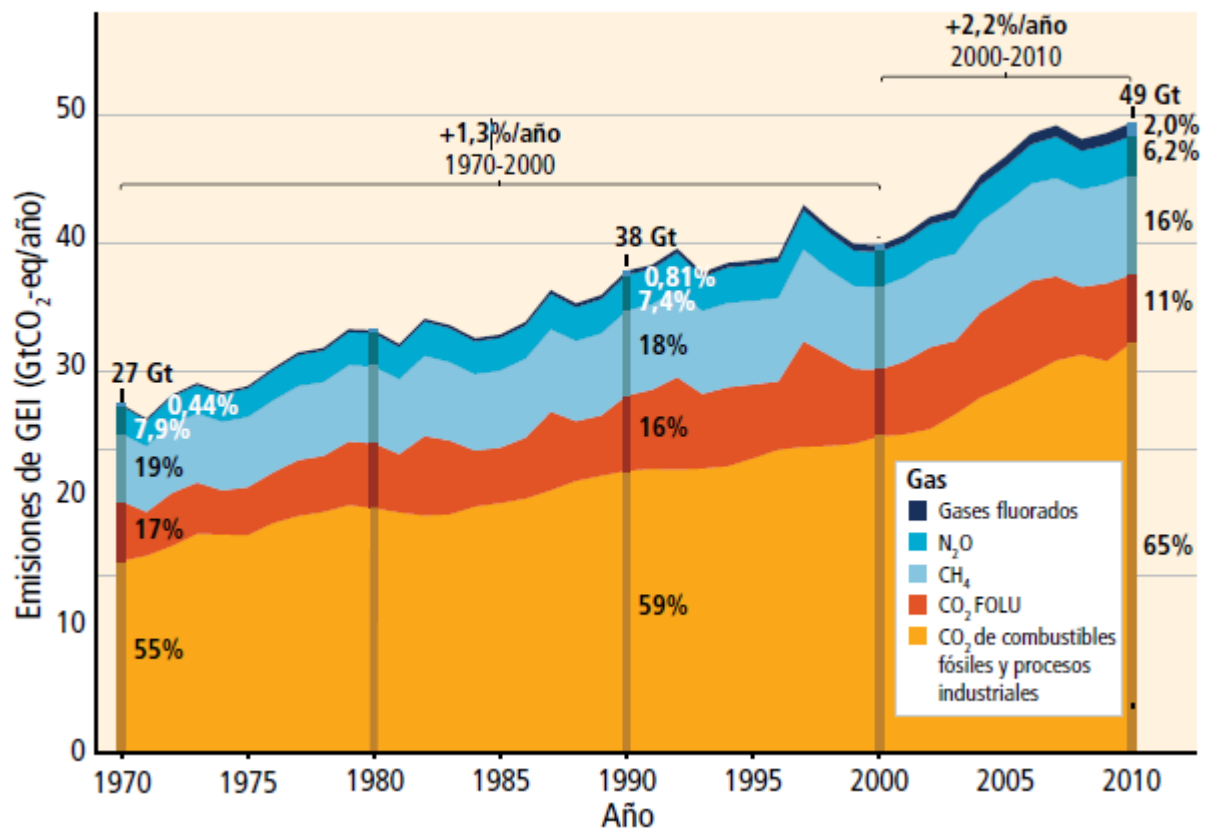


Figura IV. Evolución de las emisiones de los distintos gases de efecto invernadero (GHG) medidos en Gt de CO<sub>2</sub> equivalentes [IPCC, 2014]

El crecimiento demográfico y económico a nivel global justifica el crecimiento de las emisiones de los gases de efecto invernadero en los últimos años y, en particular, que el peso relativo de los gases fluorados haya crecido entre 2000 y 2010 un 2.3%.

Las estimaciones hechas por el IPC en 2010 nos dicen que en el sector edificios de los 3136 de CO<sub>2</sub> equivalentes alrededor de 117.6 Mt (3.75%) fueron HFC. En la industria las emisiones de HFC fueron 540 de 15443 Mt (3.5%) y en el sector transporte, los aparatos de climatización de los vehículos emitieron 151.2 de los 7000 Mt (2.16%). Por su parte, la EPA estima una emisión total de 1100 Mt de CO<sub>2</sub> equivalentes de HFC en el mundo a 2010, de las cuales un 79% son emisiones directas en sistemas de refrigeración o A/C, mientras que el resto son HFC empleados como disolventes o agentes extintores, entre otros. De ese 79%, la EPA cree que un 25% es refrigeración comercial en países desarrollados y un 15% refrigeración comercial en países en vías de desarrollo.

Bitzer indica en su informe de 2016 que la mayor contribución al calentamiento atmosférico de una instalación

frigorífica no es debida a la carga de refrigerante sino a las emisiones indirectas asociadas a la generación de la energía eléctrica consumida. En la Figura V se muestran las emisiones directas e indirectas en Mt de CO<sub>2</sub> equivalentes a nivel mundial en el año 2010 (según estimaciones independientes a las del IPCC hechas por la Corporación Alemana para la Cooperación Internacional [GIZ PROKLIMA]) en los sectores de refrigeración doméstica, refrigeración comercial, refrigeración industrial, refrigeración en transportes, instalaciones fijas de climatización y sistemas móviles de climatización de vehículos. Se observa que las emisiones indirectas superan a las directas en todos los casos excepto en la refrigeración comercial. Aun así, el impacto indirecto total es casi el doble que el directo.

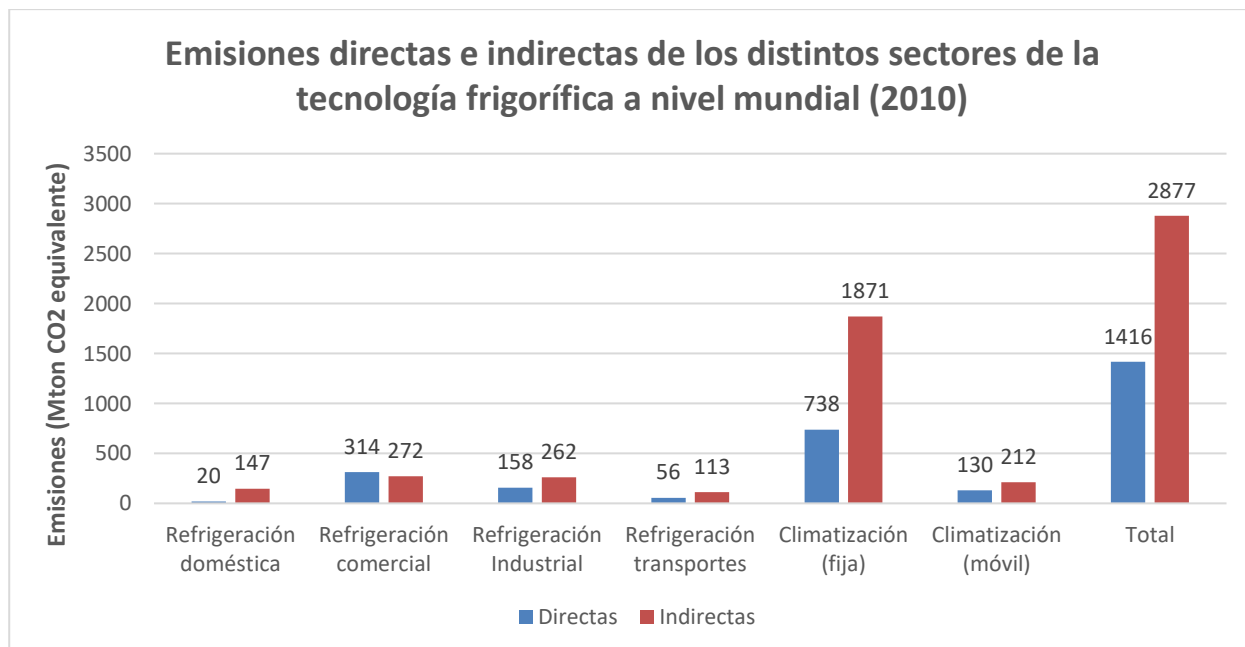


Figura V. Comparación entre emisiones directas e indirectas en los distintos sectores de aplicación de la tecnología frigorífica

Si se mantienen las tendencias actuales, se estima que la temperatura promedio habrá crecido para 2100 entre 4 y 5°. Por estos motivos, se insta a aprobar nuevas políticas que consigan restringir la temperatura a un crecimiento controlado de un 2°C. Esto se conseguirá con concentraciones equivalentes para 2100 de 450 ppm, lo que podría necesitar reducir para 2050 en los países desarrollados las emisiones de gases de efecto invernadero entre un 80 y un 95%. Aunque las emisiones directas de gases fluorados supongan un impacto casi despreciable en el calentamiento atmosférico comparado con el resto de gases de efecto invernadero, la Comisión Europea decidió publicar en 2014 una actualización del Reglamento 842/2006 sobre los gases fluorados de efecto invernadero. Este Reglamento 517/2014, conocido como Reglamento F-Gas, tiene por objeto proteger el medio ambiente mediante la reducción de las emisiones de gases fluorados de efecto invernadero (en adelante, GFEI). Mediante la F-Gas se endurecen las normas sobre contención, uso, recuperación y destrucción de los gases fluorados con respecto al anterior Reglamento; se establecen nuevas condiciones a la comercialización de los aparatos que usen dichos gases y a usos específicos de estos gases; y se fijan límites cuantitativos a la comercialización de hidrofluorocarburos.

Para incentivar la implementación de tecnologías alternativas a los gases fluorados se prohíbe de forma directa la comercialización de ciertos productos según la hoja de ruta de la Tabla II. Estas restricciones afectan a números sectores, pues implicarán la inhabilitación de los refrigerantes más usados, tal y como indica Gas Servei (2018b) en su informe del Reglamento F-Gas:

- En el sector del frío doméstico el R-134a (PCA 1430) no puede utilizarse ya en frigoríficos ni congeladores donde el PCA está limitada a 150.
- En el sector comercial, el R-404A (PCA 3260) y el R-507 (PCA 3300) no podrán utilizarse a partir de 2020 para frigoríficos ni congeladores (PCA<.2500). A partir de 2022 tampoco podrá usarse R-407C (PCA 1520) ni R-442A (PCA 1888) en estos aparatos (PCA<150). Para las centrales frigoríficas comerciales de las características que se mencionan en la tabla (PCA<150), no podrán usarse desde 2022 R-404A, R-407C o R-442A. Sí podrán seguir implementándose ciclos en cascada con R-134a en el circuito primario pues su PCA es inferior a 1500.

- En los aparatos fijos de refrigeración (PCA<2500), no podrán utilizarse a partir de 2020 el R-404A (PCA 3260) o el R-507 (PCA 3300). No estarían prohibidos ni el R-407C, ni el R-410A (PCA 1720), ni el R-442A. Para aplicaciones a temperaturas inferiores a -50°C no habrá restricciones para los refrigerantes más usados, R-23 (PCA 11700) y R-508 (PCA 11850).
- A partir del 1 de enero de 2020 tampoco se podrán emplear GFEI con PCA superior a 2500 para la revisión o el mantenimiento de los aparatos de refrigeración con un tamaño de carga superior a 40 toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub>, a excepción de si son equipos militares o los que su temperatura de evaporación sea inferior a -50°C, o si los GFEI empleados han sido regenerados o reciclados en cuyo caso estarán permitidos hasta 2030.
- En climatización, los refrigerantes más utilizados son R-134a, R-407C y R-410A. Estarán prohibidos en los equipos portátiles de aire acondicionado a partir de 2020 (PCA<150) y desde 2025 en los Split con menos de 3 kg (PCA<750).

Tabla II. Hoja de ruta de prohibiciones en la comercialización de GFEI

FECHA	PROHIBICIÓN
1 de enero de 2015	Frigoríficos y congeladores domésticos que contienen HFC con un PCA igual o superior a 150
1 de enero de 2020	Frigoríficos y congeladores para uso comercial (aparatos sellados herméticamente) que contienen HFC con un PCA igual o superior a 2500
1 de enero de 2020	Aparatos fijos de refrigeración que contengan HFC, o cuyo funcionamiento dependa de ellos, con un PCA igual o superior a 2500, excepto los aparatos diseñados para aplicaciones destinadas a refrigerar productos a temperaturas inferiores a - 50 °
1 de enero de 2020	Aparatos portátiles de aire acondicionado para espacios cerrados (aparatos sellados herméticamente que el usuario final puede cambiar de una habitación a otra) que contienen HFC con un PCA igual o superior a 150
1 de enero de 2022	Frigoríficos y congeladores para uso comercial (aparatos sellados herméticamente) que contienen HFC con un PCA igual o superior a 150
1 de enero de 2022	Centrales frigoríficas de más de un compresor compactas, para uso comercial, con una capacidad igual o superior a 40 kW, que contengan gases fluorados de efecto invernadero, o cuyo funcionamiento dependa de ellos, con un PCA igual o superior a 150, excepto en los circuitos refrigerantes primarios de los sistemas en cascada, en que pueden emplearse gases fluorados de efecto invernadero con un PCA inferior a 1500
1 de enero de 2025	Sistemas partidos simples de aire acondicionado que contengan menos de 3 kg de gases fluorados de efecto invernadero o cuyo funcionamiento dependa de ellos, con un PCA igual o superior a 750

A las anteriores hay que añadirle la prohibición de usar gases fluorados con un PCA superior a 150, en vigor desde 2017 mediante la directiva 2006/40/EC en los sistemas de climatización de los vehículos diseñados para el transporte de personas de hasta 8 plazas (excluido el conductor) y aquellos con masa de hasta 3.5 toneladas diseñados para el transporte de mercancías. Como consecuencia, el R-134a no puede ser usado en estas aplicaciones.

A estas prohibiciones hay que añadir una disminución progresiva de la cantidad máxima de hidrofluorocarburos que pueden comercializarse dentro de la UE, incluidos los contenidos en aparatos, que concluirá con una reducción al 21% como se observa en la Figura VI.

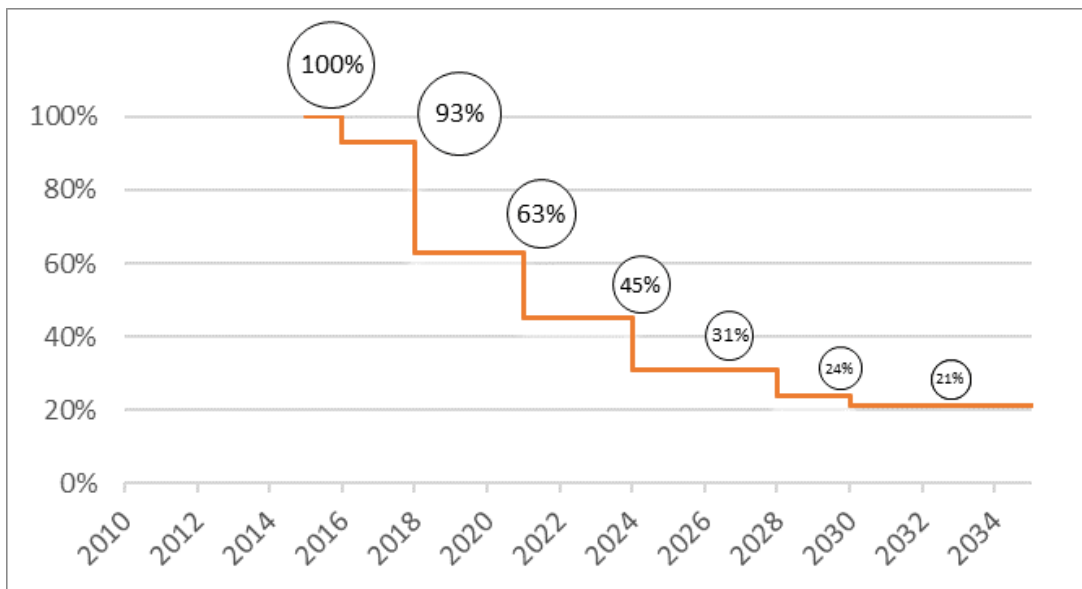


Figura VI. Porcentaje de reducción de la cantidad de HFC comercializables en la UE desde 2015

Para controlar la cantidad de HFC comercializados se repartirán cuotas entre los productores e importadores atendiendo a un sistema descrito en la F-Gas. Los aparatos que contengan GFEI que quieran ser comercializados en la UE deberán computarse dentro del sistema de cuotas. De este modo, las empresas con cuota, ya sea asignada o transferida, podrán autorizar a otra empresa a utilizarla, por ejemplo, a los importadores de aparatos que contienen HFC que no hayan sido previamente comercializados en la UE.

Según se indica en el informe de la Comisión sobre la evaluación del método de asignación de cuotas publicado el 13 de julio de 2017, se está considerando modificar el sistema de asignación de cuotas para permitir que los importadores de aparatos reciban su propia cuota. De esta manera se evitaría que algunos titulares de cuotas, que se recuerda se asignan gratuitamente, se beneficien con la concesión de autorizaciones. De hecho, tal y como indican INTARCON (2017), el precio de los principales refrigerantes se disparó el pasado verano de 2017 (Figura VII) con un incremento que es casi proporcional al PCA de los mismos. La culpa de este fenómeno la tiene dicho sistema de cuotas, que ha perturbado la libre competencia en el mercado y no ha evitado la especulación entre las grandes multinacionales de gases que poseen la gran mayoría de estos derechos de comercialización y los importadores de gas y de equipos precargados.

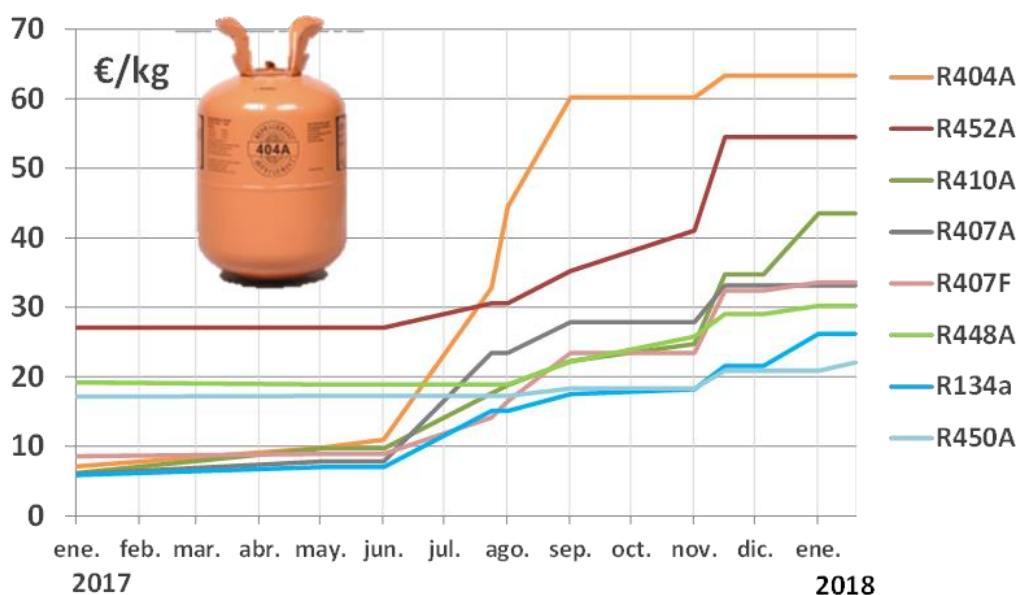


Figura VII. Incremento en los precios de los refrigerantes en 2017 [Fuente: INTARCON]

En España, el Reglamento de Seguridad para Instalaciones Frigoríficas regula en su Instrucción Técnica IF-04 Utilización de los distintos refrigerantes sobre las cargas máximas permitidas para los distintos refrigerantes según su aplicación. En este trabajo se ha querido comprobar si las directrices del RSIF, aprobado en 2011,

permiten el uso de refrigerantes alternativos a los HFC en algunos casos de estudios. Los equipos escogidos para este estudio han sido:

- Equipos compactos pequeños para refrigeración doméstica (frigoríficos y congeladores)
- Equipos compactos pequeños para climatización en viviendas (aires acondicionados portátiles)
- Equipos compactos de aire acondicionado para pequeños comercios
- Equipos partidos de aire acondicionado para viviendas
- Sistemas rooftop para supermercados
- Sistemas VRV para grandes edificios u oficinas
- Enfriadoras de agua para climatización en grandes edificios

Los principales refrigerantes candidatos a sustituir a los HFC son el HFC R-32, las HFO R-1234yf y R-1234ze(E), el amoníaco (R-717), el CO<sub>2</sub> (R-744) y los hidrocarburos, propano (R-290) e isobutano (R-600a). Como representantes de los HFC usados hoy en día se han tomado el R-134a y el R-410A.

Además, se compararán las cargas máximas permitidas así calculadas con las cargas permitidas por el proyecto de real decreto que pretende aprobar un nuevo RSIF a finales de 2018 que se hizo público en abril de ese mismo año. Los resultados se muestran en la Tabla III.

Se concluye que el RSIF 2011 impide la utilización de refrigerantes alternativos en aplicaciones de climatización en sistemas directos o indirectos abiertos (rooftop) al estar las cargas limitadas a los mínimos marcados en el artículo 2 del Reglamento: 500 g para refrigerantes del grupo de seguridad L2 (R-32, R-1234yf, R-1234ze(E) o R-717) y 200 g para refrigerantes L3 (hidrocarburos). Además, si estas cargas reducidas permitiesen el buen funcionamiento del aparato, si éste requiere instalación, entonces se deberían cumplir con los estrictos requisitos de una instalación de Nivel 2 que, en otros, obligan a que el titular de la instalación tenga contratado un seguro de responsabilidad civil que cubra los riesgos de la instalación de, al menos, 500 000€. No hay límite de carga en las enfriadoras de agua para edificios si los refrigerantes son del grupo de seguridad L1 (R-134a, R-410A y R-744) o L2. En el caso de los frigoríficos y congeladores domésticos las cargas máximas permitidas solo permitirían utilizar R-1234yf o R-1234ze(E), puesto que el R-32 está prohibido por ser su PCA mayor de 150.

Del estudio aquí realizado se puede concluir que el nuevo RSIF está claramente orientado a que los refrigerantes de la nueva clase A2L sustituyan a los HFC en todas las aplicaciones aquí estudiadas. A la clase A2L pertenecen únicamente el R-32, el R-1234yf, el R-1234ze(E) y las mezclas de estos. Tan solo en sistemas rooftop para supermercados la carga máxima permitida al amoníaco tiene un crecimiento significativo al dejar de estar limitada.

	Refrigeración doméstica (25 m3)		A/C compacto portátil (40 m3)		A/C compacto comercios (240 m3)		A/C split viviendas (50 m3)		Rooftop supermercados		VRV		Enfriadora edificios gran tamaño	
	RSIF 2011	RSIF 2018	RSIF 2011	RSIF 2018	RSIF 2011	RSIF 2018	RSIF 2011	RSIF 2018	RSIF 2011	RSIF 2018	RSIF 2011	RSIF 2018	RSIF 2011	RSIF 2018
R-134a	6.25	6.25	10	10	60	60	12.5	12.5	Sin límite	Sin límite	Sin límite	150	Sin límite	Sin límite
R-410A	11	11	17.6	17.6	105.6	105.6	22	22	Sin límite	Sin límite	Sin límite	150	Sin límite	Sin límite
R-32	1.35	1.842	0.5	2.7	0.5	5.11	0.5	4.6	0.5	Sin límite	0.5	60	Sin límite	Sin límite
R-1234yf	1.45	1.692	0.5	2.48	0.5	4.6	0.5	4.14	0.5	Sin límite	0.5	55	Sin límite	Sin límite
R-1234ze(E)	1.525	1.818	0.5	2.67	0.5	5.03	0.5	4.52	0.5	Sin límite	0.5	59	Sin límite	Sin límite
R-717	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	Sin límite	0.5	0.5 (A)   4.5 (B o C)	Sin límite	Sin límite
R-744	1.75	2.5	2.8	4	16.8	24	3.5	5	Sin límite	Sin límite	Sin límite	150	Sin límite	Sin límite
R-600a	0.275	0.215	0.2	0.378	0.2	0.44	0.2	0.4	0.2	5	0.2	1.12	0.2	5
R-290	0.2	0.19	0.2	0.334	0.2	0.375	0.2	0.34	0.2	5	0.2	1	0.2	5

Tabla III. Resumen de las cargas máximas permitidas en kg para los diferentes casos de estudios según el RSIF 2011 y el RSIF 2018

<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Índice</b>	<b>xxiii</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>xxv</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>xxvi</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2 Los refrigerantes como fluidos caloportadores</b>	<b>3</b>
2.1. <i>Denominación alfanumérica</i>	3
2.2. <i>Clasificación</i>	4
2.2.1. CFC	4
2.2.2. HCFC	4
2.2.3. FC	4
2.2.4. HFC	4
2.2.5. Hidrocarburos	4
2.2.6. HFO	4
2.2.7. Inorgánicos	4
2.2.8. Mezclas	5
2.3. <i>Propiedades</i>	5
2.3.1. Medioambientales	5
2.3.2. COP	7
2.3.3. Seguridad	9
2.3.4. Presión de evaporación y condensación (rango de operación).	10
2.3.5. Miscibilidad con el aceite lubricante.	10
2.3.6. Reactividad.	10
2.3.7. Capacidad frigorífica.	10
2.3.8. Conductividad térmica.	11
2.3.9. Detección de fugas.	11
2.3.10. Coste.	11
<b>3 Problemática</b>	<b>13</b>
3.1. <i>Evolución histórica de los refrigerantes</i>	13
3.2. <i>Problemática gases de efecto invernadero</i>	17
3.2.1. Gases de efecto invernadero	17
3.2.2. Reglamento 517/2014	19
3.2.3. El reglamento F-GAS en España.	24
<b>4 Análisis del Reglamento de Seguridad para Instalaciones Frigoríficas</b>	<b>27</b>
4.1. <i>Real decreto 138/2011</i>	27
4.1.1. Clasificaciones previas a la determinación de la carga máxima de refrigerante	27
4.1.2. Determinación de la carga máxima de refrigerante	30
4.1.3. Posibilidades de los refrigerantes alternativos	32
4.2. <i>Proyecto de nuevo Reglamento</i>	35
4.2.1. Nuevo procedimiento para el cálculo de la carga máxima	36

4.2.2. Comparación de las cargas máximas de ambos Reglamentos	40
4.3. <i>Tabla resumen</i>	44
<b>5 Conclusiones</b>	<b>47</b>
<b>Referencias</b>	<b>49</b>



# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1. Precio de los distintos refrigerantes [Fuente: Pecomark]	12
Tabla 2. Hoja de ruta de prohibiciones en la comercialización de GFEI	21
Tabla 3. Porcentaje para calcular la cantidad máxima de HFC que pueden ser comercializados	22
Tabla 4. Frecuencia mínima de control de fugas	25
Tabla 5. Clases de seguridad real decreto 138/2011	28
Tabla 6. Límites prácticos de los principales refrigerantes	33
Tabla 7. Clases de seguridad nuevo RSIF	37
Tabla 8. Cota superior de la carga máxima por inflamabilidad en emplazamientos de tipo 1 o 2 para aplicaciones distintas del confort humano	38
Tabla 9. Comparación de la carga máxima permitida para los aparatos compactos de refrigeración doméstica entre el RSIF de 2011 y el nuevo proyecto de RSIF para 2018	40
Tabla 10. Comparación de la carga máxima permitida para los aparatos portátiles de A/C entre el RSIF de 2011 y el nuevo proyecto de RSIF para 2018	41
Tabla 11. Comparación de la carga máxima permitida para los equipos compactos horizontales entre el RSIF de 2011 y el nuevo proyecto de RSIF para 2018	41
Tabla 12. Comparación de la carga máxima permitida para los equipos partidos Split entre el RSIF de 2011 y el nuevo proyecto de RSIF para 2018	42
Tabla 13. Comparación de la carga máxima permitida para los sistemas VRV entre el RSIF de 2011 y el nuevo proyecto de RSIF para 2018	43
Tabla 14. Comparación de la carga máxima permitida para las enfriadoras de agua entre el RSIF de 2011 y el nuevo proyecto de RSIF para 2018	43
Tabla 15. Resumen de las cargas máximas permitidas en kg para los diferentes casos de estudios según el RSIF 2011 y el RSIF 2018	45

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1. Contribución al calentamiento atmosférico de los impactos directo e indirecto	6
Figura 2. Variación del TEWI con la carga de refrigerante y la potencia consumida.	7
Figura 3. COP para distintos refrigerantes en un ciclo con compresión isentrópica sin subenfriamiento ni sobrecalentamiento: (a) variando $T_e$ fijando $T_c = 40^\circ\text{C}$ ; (b) variando $T_c$ fijando $T_e = 0^\circ\text{C}$ ; (c) y (d) idénticos a los casos anteriores, pero representando el cociente COP entre $\text{COP}_{\text{carnot}}$	8
Figura 4. Capacidad frigorífica en función de la temperatura de evaporación para distintos refrigerantes	11
Figura 5. Evolución de los HCFC consumidos a nivel mundial	15
Figura 6. Evolución del consumo de HCFC en Estados Unidos	16
Figura 7. Evolución del consumo y producción de HCFC en China	16
Figura 8. Evolución de las emisiones de los distintos gases de efecto invernadero (GHG) medidos en Gt de $\text{CO}_2$ equivalentes [IPCC, 2014].	18
Figura 9. Emisiones de gases de efecto invernadero por sector en 2010 [IPCC, 2014].	19
Figura 10. Comparación entre emisiones directas e indirectas en los distintos sectores de aplicación de la tecnología frigorífica	20
Figura 11. Porcentaje de reducción de la cantidad de HFC comercializables en la UE desde 2015	22
Figura 12. Incremento en los precios de los refrigerantes en 2017 [Fuente: INTARCON]	24
Figura 13. Clasificación de los sistemas de refrigeración	29
Figura 14. Comparación de la carga máxima para distintos refrigerantes en sistemas de refrigeración doméstica con respecto al R-134a	34

# 1 INTRODUCCIÓN

---

La importancia de la tecnología frigorífica en nuestra sociedad es incuestionable. La magnitud de esta rama de la ingeniería se hace evidente viendo sus tres campos de aplicación principales: la refrigeración, la climatización y las bombas de calor.

Las tecnologías de refrigeración incluyen el frío comercial, el frío doméstico, el frío industrial, la refrigeración de transportes y otras aplicaciones especiales. El frío comercial y el doméstico permiten la conservación de alimentos, puede ser refrigeración de alta temperatura o congelación, solo diferenciándose en la potencia necesaria. El frío industrial incluye aplicaciones diversas como la conservación de alimentos o el control de procesos químicos, se dividen según la temperatura de evaporación necesaria en alta, media y baja. La refrigeración de transportes está enfocada también a la conservación de alimentos, depende del vehículo a refrigerar: camiones, tráileres, barcos, etc. Por último, existen aplicaciones especiales como la refrigeración a muy baja temperatura (menores de  $-50^{\circ}\text{C}$ ).

Las tecnologías de climatización tienen por objetivo dar confort térmico a las personas. Incluyen aplicaciones fijas, es decir, en edificios, y aplicaciones móviles tales como la climatización de vehículos.

Las bombas de calor tienen aplicaciones en baja temperatura ( $45^{\circ}\text{C}$ ) para climatización, media temperatura ( $60^{\circ}\text{C}$ ), principalmente para producción de agua caliente empleada en duchas, sanitarios y piscinas, y alta temperatura ( $70^{\circ}\text{C}$ ) para aplicaciones industriales.

Ninguna instalación frigorífica sería posible sin su elemento fundamental: el refrigerante.

Este trabajo de fin de grado tiene dos objetivos principales. Por un lado, realizar una exposición clara y concisa de la problemática actual relativa a los refrigerantes fluorados; por otro, se pretende analizar las sustancias candidatas a reemplazar a estos refrigerantes y las dificultades impuestas por nuestro Reglamento de Seguridad para Instalaciones Frigoríficas del 2011, comparándolo con el nuevo proyecto de Reglamento que se pretende que entre en vigor a finales de 2018.

A lo largo de la historia de la ingeniería frigorífica se han probado decenas de refrigerantes sin que aún ninguno, a excepción quizás del amoníaco en la industria, se haya asentado de forma indiscutible para alguna aplicación determinada. En el capítulo 2 se presentarán los diferentes refrigerantes y sus propiedades más destacadas, justificándose así que no existe un refrigerante perfecto.

Actualmente nos encontramos inmersos en una nueva crisis de refrigerantes. El capítulo 3 comenzará relatando la historia de los refrigerantes desde su origen hace 200 años. Se describirá la problemática que surgió en los años 90 que relacionaba a los refrigerantes usados en aquel entonces con el agotamiento de la capa de ozono para ver como los refrigerantes que formaron parte de la solución a esta crisis nos han llevado a un nuevo problema por el calentamiento atmosférico. Esta cuestión será tratada en la segunda parte del capítulo 3, donde se pretende aclarar cuál es el papel real de los refrigerantes fluorados en este asunto y explicar las implicaciones del Reglamento 517/2014 sobre los gases fluorados publicado por la Comisión Europea.

Hay que señalar que algunos fluidos halogenados que se emplean como refrigerantes también se utilizan en equipos de protección contra incendios, en la aparatamenta eléctrica y como fluido de trabajo en los ciclos de Rankine orgánicos. Aunque la normativa también hace referencia a estas aplicaciones, el presente trabajo se enfoca principalmente en las implicaciones para la tecnología frigorífica

Por último, en el capítulo 4 se estudiarán qué posibilidades ofrece el RSIF a los principales refrigerantes considerados alternativos para la refrigeración doméstica y en algunas aplicaciones concretas de climatización. Además, con motivo de la publicación del proyecto de real decreto que pretende aprobar un nuevo RSIF, se van a comparar las cargas máximas permitidas por la normativa actual y este nuevo Reglamento a los refrigerantes alternativos con el fin de identificar hacia que direcciones se está moviendo el sector de la tecnología frigorífica.



# 2 LOS REFRIGERANTES COMO FLUIDOS CALOPORTADORES

---

Los refrigerantes son los fluidos que transportan el calor en los circuitos frigoríficos. Absorben el calor a baja presión y temperatura, cediéndolo a alta presión y temperatura. Este capítulo trata de dar una visión ingenieril de los refrigerantes, centrándose en su diferentes clasificaciones, nomenclaturas y propiedades, atendiendo a características termodinámicas, físicas, medioambientales o económicas.

En una instalación frigorífica encontramos refrigerantes que transfieren calor con cambio de fase y otros que lo hacen de forma sensible. Los primeros se denominan refrigerantes primarios (o frigorígenos) y son los que circulan por el circuito frigorífico, evaporándose al absorber calor del foco frío y condensándose al cederlo en el foco caliente. Por su parte, los segundos, que se llaman refrigerantes secundarios (o frigorífenos), son enfriados por el refrigerante primario en el evaporador para luego absorber calor en el medio a enfriar [Ernesto Rodríguez, 2005]. Por ejemplo, en una instalación de climatización con fan coil el R-134a (refrigerante primario) de una enfriadora, enfría agua (refrigerante secundario) para enfriar a su vez directamente el aire de los locales. Como en este trabajo nos centraremos en el estudio de los refrigerantes frigorígenos nos referiremos a ellos utilizando únicamente el término refrigerantes.

## 2.1. Denominación alfanumérica

Los refrigerantes pueden nombrarse usando su fórmula química, su nombre químico o por su denominación alfanumérica. Esta última fue desarrollada por ASHRAE (*The American Society of Heating, Refrigeration, Air-Conditioning Engineers*) y publicada por primera vez en su Standard 34 en 1997, cuya versión más reciente es de 2016. También existe un estándar ISO que explica esta clasificación, la norma ISO 817:2014 Refrigerants - *Designation and safety classification*.

Atendiendo a este proceder, el primer dígito comenzando por la derecha representa el número de átomos de flúor en la molécula; el siguiente por la derecha es el número de átomos de hidrógeno más uno; el tercero es el número de átomos de carbono menos uno, si fuese cero no se escribe; por último, se podría añadir un número más que simbolice el número de enlaces que no sean simples. El resto de enlaces se completan añadiendo cloro. Si además el refrigerante es un compuesto isómero, es decir, que para su fórmula química son posibles más de una estructura, aparecerá una letra minúscula a continuación de los números. La estructura más simétrica, en términos de reparto de pesos atómicos, no lleva letra, mientras que al aumentar la asimetría se emplearán las letras a, b, c, etc.

Por ejemplo, el refrigerante más empleado para los sistemas de climatización en automóviles es el R-134a. El primer dígito de la derecha nos indica que tiene cuatro átomos de flúor por molécula; el siguiente nos dice que tiene dos átomos de hidrógeno; y el primer dígito por la izquierda que es un etano. Esta molécula puede tener dos estructuras: la más simétrica sería 1,1,2,2-tetrafluoroetano ( $\text{CHF}_2\text{CHF}_2$ ), pero también sería posible 1,1,1,2-tetrafluoroetano ( $\text{CF}_3\text{CHF}_2$ ). Como al final de los números aparece la letra “a”, la molécula de R-134a no tiene la estructura simétrica, sino la segunda de las dos anteriores.

Para las mezclas de refrigerantes se reservan las series 400 si son no azeotrópica y 500 para las que sí lo son. El número es arbitrario y hay que consultar una lista para saber que refrigerantes las forman. Se añaden al final las letras A, B, C, etc. cuando una mezcla puede presentarse con distintas proporciones de sus constituyentes. Del mismo modo, para los hidrocarburos se emplea la serie 600.

Por último, los refrigerantes inorgánicos utilizan la serie 700 acabada en el peso molecular de la sustancia. De este modo, la denominación alfanumérica del amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) es R-717.

Finalmente, hay que añadir que algunos refrigerantes sintéticos, sobre todo mezclas, tienen un nombre

comercial. Aun así, este identificativo nunca debe considerarse suficiente para determinar a un refrigerante.

## 2.2. Clasificación

Los refrigerantes pueden clasificarse según los elementos químicos que los forman en orgánicos e inorgánicos. A su vez, los orgánicos pueden encontrarse en la naturaleza, como serían algunos hidrocarburos, o ser sintéticos. Los refrigerantes sintéticos que contienen cloro o flúor en sus moléculas se llaman también refrigerantes halogenados.

### 2.2.1. CFC

Son refrigerantes halogenados compuestos por cloro, flúor y carbono. Son compuestos muy estables lo cual, a pesar de ser una ventaja para sus aplicaciones en refrigeración, favorece que también lleguen a altas capas de la atmósfera provocando la destrucción de la capa de ozono. Los más relevantes son el R-11 y el R-12 [Stoecker, 1998].

### 2.2.2. HCFC

Son refrigerantes halogenados que además de cloro, flúor y carbono tienen hidrógeno. Fueron los sustitutos de los CFCs ya que el átomo de hidrógeno merma la estabilidad de la molécula, destruyéndose en gran medida antes de alcanzar la estratosfera. El HCFC más importante es el R-22 [Stoecker, 1998].

### 2.2.3. FC

Son refrigerantes orgánicos formados por flúor y carbono. No dañan la capa de ozono al no tener cloro en su composición, pero debido al elevado tiempo de residencia en la atmósfera tienen un muy alto potencial de calentamiento atmosférico. De cualquiera manera, no son sustancias usadas habitualmente como refrigerantes. Encontramos entre los FC el R-14 o el R-116 [Ernesto Rodríguez, 2005].

### 2.2.4. HFC

Son refrigerantes halogenados que sólo contienen hidrógeno, flúor y carbono. Se diseñaron para sustituir a los CFCs y a los HCFCs, siendo los más extendidos actualmente. Al ser sus moléculas menos estables que la de los otros dos grupos, y como no tienen cloro en su composición, no dañan a la capa de ozono. Aunque como tienen flúor sí acentúan el efecto invernadero. Algunos HFCs son el R-134a o el R-32.

### 2.2.5. Hidrocarburos

Son refrigerantes naturales, sin efectos adversos contra el medio ambiente, que solo contienen carbono e hidrógeno. Aun así, son muy inflamables. Podemos destacar el isobutano (R-600a) y el propano (R-290) [Stoecker, 1998].

### 2.2.6. HFO

Las hidrofluorolefinas son refrigerantes sintéticos orgánicos compuestos por carbono, hidrógeno y flúor, pero a diferencia de los HFCs las moléculas de esto no están saturadas, existiendo un doble enlace entre dos átomos de carbono. Son la cuarta generación de refrigerantes fluorados y se caracterizan por su bajo potencial de calentamiento atmosférico y su ligera inflamabilidad. Señalamos dentro de esta categoría al R-1234yf y al R-1234ze(E).

### 2.2.7. Inorgánicos

Fueron los primeros refrigerantes que se emplearon. Son ecológicos y baratos, pero tóxicos e inflamables algunos de ellos. Destacamos el CO<sub>2</sub> (R744), el amoníaco (R717) y el agua (R718).

## 2.2.8. Mezclas

Las mezclas de refrigerantes se hacen con fluidos orgánicos de alguno de los grupos anteriores. Permiten tener un refrigerante con unas propiedades determinadas de presión, temperatura, seguridad o miscibilidad con los aceites, que bien pueden satisfacer algunas funciones específicas para las que no hay ningún refrigerante puro válido o para las que sí los hay, aunque afectando negativamente al medio ambiente o poniendo en peligro a las personas. Las mezclas pueden ser azeotrópicas si, en un rango de operación, el cambio de fase ocurre a temperatura prácticamente constante, o mezclas no azeotrópicas si no se comportan como refrigerantes puros, es decir, existe una diferencia de temperatura (llamado glide o deslizamiento) entre las temperaturas de saturación de los componentes de la mezcla. La mezcla R-502, hecha con R-22 y R-155, es un ejemplo de mezcla azeotrópica. En cambio, el R-404a no se comporta de forma perfectamente azeotrópica para un gran rango de presiones por lo que se considera una mezcla cuasi-azeotrópica [Stoecker, 1998].

## 2.3. Propiedades

A continuación, se analizan las características fundamentales de los refrigerantes:

### 2.3.1. Medioambientales

A lo largo de los últimos años, se han identificado algunos fenómenos medioambientales negativos provocados por las emisiones de refrigerantes que contienen cloro o flúor. Estas emisiones ocurren como fugas durante la operación normal de las instalaciones o durante las labores de mantenimiento, de carga o descarga, entre otras. Nos referimos al agotamiento de la capa de ozono y al efecto invernadero, que se verán con más profundidad en el capítulo posterior. Para cuantificar estos efectos se han definido dos indicadores.

El potencial de agotamiento de la capa de ozono (PAO, o ODP en inglés por ozone depletion potential) que toma como referencia el efecto producido por el R11, al que se le asigna arbitrariamente el valor 1.

El potencial de calentamiento atmosférico (PCA, o GWP en inglés por global warming potential) se define como el potencial de calentamiento climático en 100 años respecto al efecto que tendría 1 kg del CO<sub>2</sub>. Se mide por tanto en kg equivalentes de CO<sub>2</sub>.

El sistema frigorífico contribuye al calentamiento atmosférico por tres efectos principalmente. En primer lugar, como el sistema está a más presión que el ambiente es inevitable que parte de la carga de refrigerante se fugue al exterior. Este impacto se calcula como el producto del PCA [kg equivalentes CO<sub>2</sub>/kg refrigerante] por el índice de fugas L en kg refrigerante/año y el número de años de vida útil de la instalación (ecuación 2-1). En segundo lugar, hay otra contribución directa asociada a las operaciones de recuperación al final de su vida útil. Se cuantifica como la fracción del producto del PCA por la carga de refrigerante m que no es capaz de recuperarse (ecuación 2-2). Por último, a lo largo de su vida útil el sistema consume una potencia eléctrica. La generación de dicha energía eléctrica tiene aparejado a su vez una emisión de CO<sub>2</sub> que debe computarse como un impacto indirecto de la instalación. Se calcula como el producto de los kWh al año consumidos por el número de años y un factor de emisión β, propio de la red eléctrica española, en kg de CO<sub>2</sub> por kWh (ecuación 2-3).

$$\text{Efecto directo por fugas} = PCA \cdot L \cdot n \quad (2-1)$$

$$\text{Efecto directo por recuperación} = PCA \cdot m \cdot (1 - \alpha_{\text{recuperación}}) \quad (2-2)$$

$$\text{Efecto indirecto por consumo eléctrico} = n \cdot E_{\text{anual}} \cdot \beta \quad (2-3)$$

El TEWI o impacto total equivalente sobre el calentamiento atmosférico es un parámetro que aúna tanto los efectos directos como los indirectos (ecuación 2-4). Se emplea para comparar sistemas alternativos o con distintos refrigerantes. Bizter indica en su informe de 2016 que la mayor contribución al calentamiento atmosférico de una instalación frigorífica no es debida a la carga de refrigerante sino a las emisiones indirectas asociadas a la generación de la energía eléctrica consumida. De igual manera, la norma UNE-EN 378:2016 afirma que es mejor para el medio ambiente aumentar la eficiencia, es decir, reducir el consumo eléctrico, que reducir la carga de refrigerante.

$$TEWI = PCA \cdot L \cdot n + PCA \cdot m \cdot (1 - \alpha_{recuperación}) + n \cdot E_{anual} \cdot \beta \quad (2-4)$$

La carga de refrigerante  $m$  y la vida útil  $n$  son datos intrínsecos a la propia instalación. El PCA depende únicamente del refrigerante utilizado. El consumo eléctrico anual  $E_{anual}$  depende del rendimiento del ciclo. El factor de emisión  $\beta$  es intrínseco del sistema eléctrico, estimándose en 0.331 kg CO<sub>2</sub> por kWh para la red española. El factor de recuperación  $\alpha_{recuperación}$  se encuentra entre 0 y 1, se puede estimar un valor de 0.95. El factor de fugas  $L$  dependen del tamaño de la instalación, pueden aproximarse como  $0.4 \cdot m^{2/3}$  [Mineco, 2018].

Supongamos un sistema con R-134a, con una temperatura de evaporación de -10°C y una temperatura de condensación de 40°C. La potencia frigorífica es 13.5 kW y el consumo eléctrico es 5 kW. La carga de refrigerante es de 10 kg y la instalación funciona 5000 horas al año. Se estima una vida útil de 15 años. Vamos a calcular el efecto sobre el calentamiento de las fugas, la recuperación y el consumo eléctrico.

Las fugas son proporcionales al PCA, que para el R-134a tiene un valor de 1430. El factor de fugas se estima con la aproximación anterior  $L = 0.4 \cdot 10^{2/3} = 1.857 \text{ kg/año}$ . Por tanto, el impacto directo de las fugas a lo largo de la vida útil es 39.8 toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub>.

Al final de la vida útil, el refrigerante no recuperado provoca un impacto que se calcula como el producto de la carga de refrigerante, por su PCA y por  $1 - \alpha_{recuperación}$ , que se supondrá para este ejemplo como 0.8. Resulta 2.86 toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub>.

Finalmente, el impacto indirecto se calculará suponiendo un factor de emisión de 0.331. La energía consumida al año se calcula como 5 kW por 5000 horas al año (25000 kWh al año). Resulta, a lo largo de los 15 años de vida útil, como 124.1 toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub>. El TEWI total, suma de los tres anteriores, sería 166.8 toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub>.

En la Figura 1 se observa que el impacto indirecto es aproximadamente un 75% del impacto total. Además, como el efecto directo debido a la recuperación es prácticamente despreciable, la proporción entre impacto por fugas e impacto indirecto no se debe al horizonte temporal de la instalación, sino a que el potencial de calentamiento atmosférico de las fugas anuales es mucho menor que el de la energía consumida.

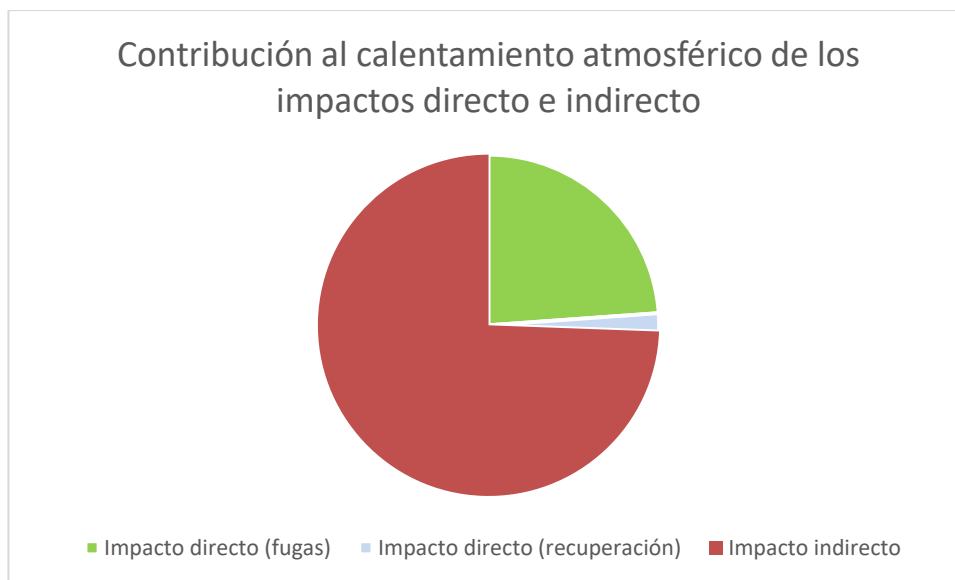


Figura 1. Contribución al calentamiento atmosférico de los impactos directo e indirecto

A continuación, se va a comparar el efecto que tendría en el TEWI aumentar la carga de refrigerante frente al que supondría disminuir la eficiencia de la instalación. Por un lado, se ha variado la carga de 10 a 20 kg (de 0 a 100%) manteniendo la potencia consumida en 5 kW. Por otro, para una carga de refrigerante constante de 10 kg se ha variado la potencia del compresor de 5 kW a 7.5 kW (0 a 50%). En la Figura 2 se representa la variación del TEWI, calculado como  $\frac{TEWI - TEWI_{inicial}}{TEWI_{inicial}} \cdot 100$  con la carga y la potencia. Se puede ver que el TEWI aumenta



más con la potencia que con la carga de refrigerante. De esta manera, para conseguir un incremento del TEWI del 10% manteniendo la carga a 10 kg, la potencia habría de aumentar en un 14%, mientras que para conseguir el mismo crecimiento aumentando la carga, esta tendría que crecer un 60%.

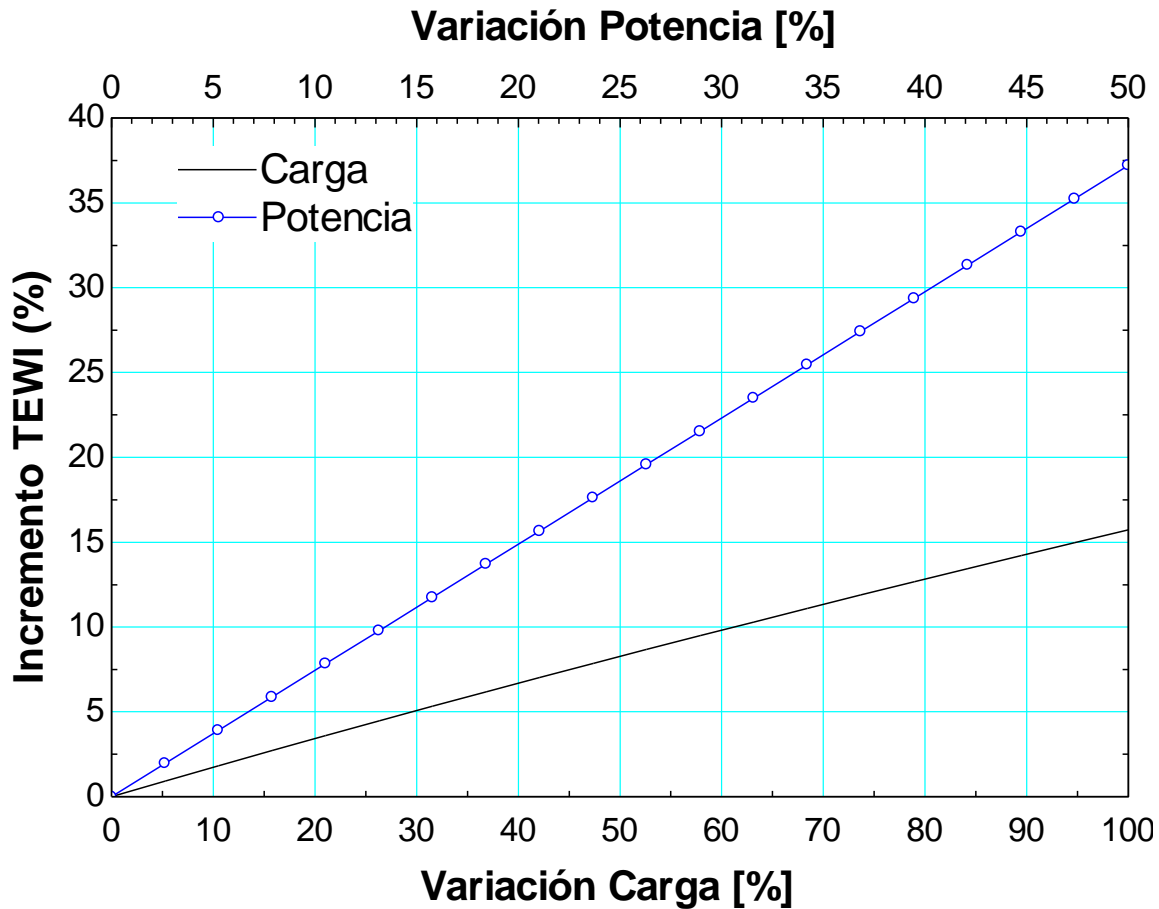


Figura 2. Variación del TEWI con la carga de refrigerante y la potencia consumida.

Como el efecto indirecto del TEWI es directamente proporcional tanto a la potencia consumida como al factor de emisión, se pueden extrapolar estas conclusiones al factor  $\beta$ . Si se fomentan las energías bajas en  $\text{CO}_2$  como las renovables o incluso la energía nuclear se repercutiría de forma favorable en las emisiones indirectas.

### 2.3.2. COP

El rendimiento de los ciclos frigoríficos se evalúa a través del coeficiente de eficiencia energética (coefficient of performance, en inglés). Se define como la potencia que produce el efecto útil entre la potencia aportada, es decir, la del compresor. En las máquinas frigoríficas el efecto útil es la potencia frigorífica dada en el evaporador, mientras que para las bombas de calor el efecto útil es la potencia en el condensador. El COP está acotado superiormente por el COP de la máquina de Carnot, que es función únicamente de las temperaturas del foco frío y del foco caliente:

$$\text{Máquina frigorífica, } COP_{\text{Carnot}} = \frac{T_f}{T_c - T_f} \quad (2-5)$$

$$\text{Bomba de calor, } COP_{\text{Carnot}} = \frac{T_c}{T_c - T_f} \quad (2-6)$$

El ciclo de Carnot consta de dos procesos isotermos (transferencia de calor en evaporador y condensador con cambio de fase), una compresión isentrópica dentro de la zona líquido-vapor y una expansión isentrópica. El ciclo real difiere del ciclo ideal en los siguientes puntos:

- Para que exista transferencia de calor, la temperatura de evaporación debe ser inferior a la del foco frío

y la temperatura de condensador debe ser superior a la del foco caliente.

- Al compresor no puede entrarle refrigerante en fase líquida. Además, la compresión no se realiza isentrópicamente, consumiéndose más potencia que en el ciclo de Carnot.
- La expansión se realiza en una válvula que puede aproximarse como isentálpica, pero no como isentrópica.
- No se puede evitar que el evaporador sobrecaliente el vapor y el condensador subenfrie el líquido.
- Hay pérdidas de presión en todas las líneas.

El COP depende de las temperaturas de operación, del ciclo frigorífico utilizado y del fluido refrigerante. Esto último se debe a que las propiedades termodinámicas de cada fluido afectan, por ejemplo, a la potencia frigorífica según sea la entalpía de vaporización, al trabajo consumido en el compresor según sean las curvas de entropía constante o a las pérdidas por rozamiento debido a la viscosidad en fase vapor.

Para comparar cualitativamente el COP de los refrigerantes más utilizados se ha simulado en EES un ciclo de compresión mecánica simple sin subenfriamientos ni sobrecalentamientos con compresión isoentrópica, obteniéndose las cuatro gráficas de la Figura 3. Los refrigerantes analizados han sido R-11, R-22, R-134a, R-410A, R-32, R-1234yf, R-717 y R-600a. En primer lugar, se ha representado el COP variando la temperatura de evaporación desde  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $10^{\circ}\text{C}$ , manteniendo constante la temperatura de condensación en  $40^{\circ}\text{C}$  (Figura 3(a)). Por otro lado, se ha variado la temperatura de condensación desde  $20^{\circ}\text{C}$  hasta  $50^{\circ}\text{C}$  manteniendo la temperatura de evaporación constante en  $0^{\circ}\text{C}$  (Figura 3(b)). Las figuras 3(c) y 3(d) se corresponden respectivamente con los dos casos anteriores, pero en lugar de representar el COP se muestra el cociente entre COP y el COP del ciclo de Carnot considerando las temperaturas de evaporación y condensación como las temperaturas de los focos frío y caliente respectivamente. Se observa que en el COP aumenta siempre que aumenta la temperatura de evaporación o disminuye la de condensación, es decir, cuando disminuye el salto de temperaturas.

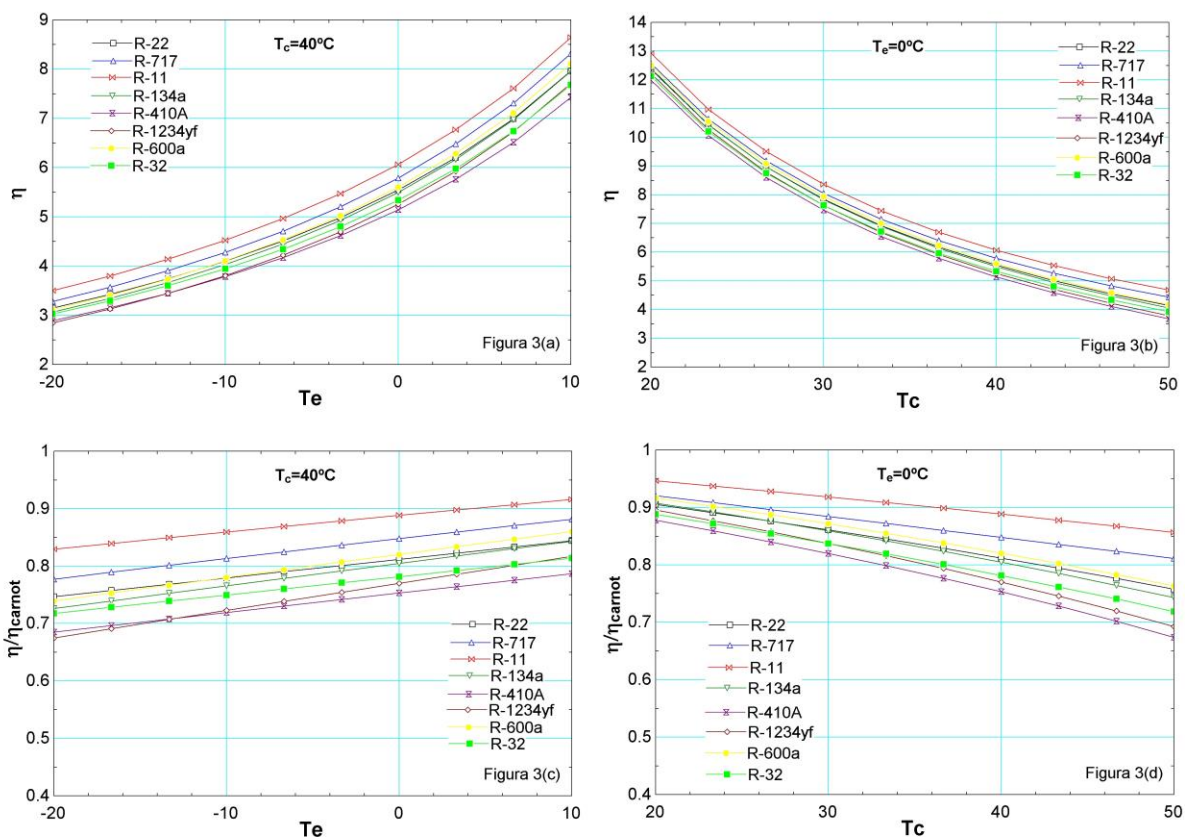


Figura 3. COP para distintos refrigerantes en un ciclo con compresión isentrópica sin subenfriamiento ni sobrecalentamiento: (a) variando  $T_e$  fijando  $T_c = 40^{\circ}\text{C}$ ; (b) variando  $T_c$  fijando  $T_e = 0^{\circ}\text{C}$ ; (c) y (d) idénticos a los casos anteriores, pero representando el cociente  $\text{COP}/\text{COP}_{\text{carnot}}$

Se observa que la mayoría de los refrigerantes dan rendimientos muy similares. El R-11 da el máximo rendimiento de entre los fluidos analizados, pero éste refrigerante como se verá posteriormente ya está prohibido en todo el mundo por lo que es el amoníaco (R-717) la sustancia con mejor COP actualmente. Aun así, se puede conseguir que un equipo funcione con el mismo COP al cambiar de refrigerante si se ajustan las características del ciclo, como podría ser disminuir el salto de temperaturas.

### 2.3.3. Seguridad

Los refrigerantes, al igual que el resto de fluidos térmicos, pueden ser fluidos peligrosos. Principalmente la seguridad de los refrigerantes se define según dos factores, su toxicidad y su inflamabilidad, aunque habría que añadir un tercero, inevitable, que es el desplazamiento del oxígeno. El refrigerante ideal debería no ser inflamable ni tóxico. Sin embargo, esto no ocurre para muchas de estas sustancias, sobre todo, para aquellas consideradas hoy en día alternativas a los HFC.

La toxicidad de un refrigerante es la característica que lo hace dañino o letal para las personas o dificulta su capacidad de escapar porque, por ejemplo, provoque ceguera o lagrimeo, debido a una exposición intensa o prolongada por inhalación de los mismos. Hay que destacar que no se considera dañino un malestar temporal que no perjudique a la salud.

La toxicidad en los refrigerantes se rige por la máxima en toxicología “dosis solo facit venenum”, que vendría a decir que sólo son peligrosos si se superan ciertas concentraciones en el aire. Se cuantifica a través del límite ATEL. El límite de exposición de toxicidad aguda (LETA/ATEL) se define como la concentración máxima recomendada de refrigerante que tienen por finalidad reducir el riesgo de toxicidad aguda para los humanos en caso de fuga o liberación de refrigerantes. Este factor contempla los distintos grados de toxicidad, desde el efecto anestésico a la mortalidad, pasando por la toxicidad cardíaca (dificultad del corazón para bombear la sangre suficiente), entre otros.

La inflamabilidad es la capacidad de un refrigerante para propagar una llama desde una fuente de ignición. Queda definida mediante el límite inferior de inflamabilidad (LII) y la temperatura de autoignición. El LII es la concentración mínima de refrigerante que es capaz de propagar una llama en una mezcla homogénea de aire y refrigerante, mientras que la temperatura de autoignición es aquella por encima de la cual el refrigerante puede quemarse de forma espontánea sin necesidad de una fuente de ignición en una atmósfera normal.

Por último, el límite de anoxia (ODL, oxygen deprivation limit) es la concentración de refrigerante que provoca un desplazamiento del oxígeno del ambiente tal que no haya oxígeno suficiente para la respiración normal. La concentración de refrigerante es la que hace que el oxígeno se encuentra en el ambiente a un cierto porcentaje cercano al 18%.

El Standard 34 de ASHRAE define un nuevo parámetro, el límite de concentración de refrigerante (RCL), que aúna los tres efectos anteriores. De este modo, el RCL es la concentración máxima de refrigerante admisible en el aire, que evita que haya riesgo de toxicidad aguda, asfixia por falta de oxígeno y peligro de inflamabilidad. Se calcula por tanto como el mínimo del LETA, ODL y el límite de concentración inflamable (FCL), que corresponde a un cierto porcentaje del LII (generalmente un 20%). No se debe confundir el RCL con el límite práctico (LP) que es la concentración máxima de refrigerante en un local que no reduce la capacidad de escapar de los ocupantes ni genera un riesgo de ignición. En realidad, el LP coincide normalmente con el RCL, aunque en otras ocasiones se emplean valores históricos de carga límite.

Posteriormente, en la norma UNE-EN 378:2016 aparecen dos nuevos factores, el QLMV y el QLAV.

El QLMV o carga límite con ventilación mínima es la concentración de refrigerante que daría lugar a una concentración igual al RCL en un recinto no hermético en el que existe una fuga elevada de refrigerante (10 kg/h, o 2.78 g/s), considerando una abertura de 0.0032 m<sup>2</sup>. Esta abertura corresponde a una puerta de 0.8 m de anchos y una separación de 4 mm.

Por su parte, el QLAV o carga límite con ventilación adicional es la concentración de refrigerante que, de liberarse toda la carga de refrigerante en el local, crearía un ambiente de peligro. Se determina como el menor entre el ODL y el 50% del LII, excepto el R-744 (CO<sub>2</sub>) que se termina para una concentración del 10%.

Respecto al dióxido de carbono hay que señalar que, aunque no es una sustancia tóxica, sí que provoca otros efectos adversos en los organismos. De hecho, para concentraciones mayores del 3% ocasionan malestar como dolor de cabeza, mareos o hiperventilación. Concentraciones superiores al 10% acarrear la pérdida de conciencia

o incluso la muerte, la que es segura para concentraciones mayores al 30%.

### 2.3.4. Presión de evaporación y condensación (rango de operación).

La temperatura de evaporación viene marcada por la aplicación que queramos desarrollar. Para esta temperatura, será más conveniente aquel refrigerante que tenga la presión de saturación más baja, aunque siempre superior a la atmosférica para evitar la entrada de aire, pues eso facilita el diseño mecánico de las válvulas y tuberías. Por su parte, la temperatura de condensación viene también fijada por el medio disponible para ello. Interesa de nuevo que esta presión sea lo más baja posible para minimizar el número de etapas de compresión y facilitar también el diseño mecánico [Stoecker, 1998].

Como ejemplo paradigmático tenemos el agua (R-718). Puesto que su temperatura de saturación a presión ambiente es de 100°C, cualquier uso de esta sustancia como refrigerante implicaría trabajar en condiciones de vacío. Aun afrontando este inconveniente, nos encontramos otro: la relación de compresión para el agua entre 50°C y 0°C es de 20.19 cuando para el R-22 es inferior a 4 y para el amoníaco (R717) es 4.73 para el mismo salto de temperaturas. Otro ejemplo ilustrativo ocurre con el R-134a, su temperatura de saturación a presión ambiente es -20°C, lo cual es bastante alto comparado con otros refrigerantes (-41.09°C para R-22, -46.5°C para R-404a, -43.9°C para R-407c o -51.91°C para R32, entre otros). Esto implica que el R-134a no es un refrigerante adecuado para aplicaciones de baja temperatura, pero sí lo es para otras de media o alta (de hecho, su aplicación principal, hasta 2017 que fue prohibido en Europa, era la climatización de vehículos) puesto que su presión de condensación es, como consecuencia de lo anterior, inferior al resto de sustancias comentadas.

### 2.3.5. Miscibilidad con el aceite lubricante.

La lubricación es necesaria para principalmente reducir el rozamiento entre las partes metálicas del compresor, reduciendo así el desgaste del mismo y también el ruido producido. Se debe garantizar la mezcla entre el refrigerante y el lubricante para que éste, al ser arrastrado por el primero, no se deposite en ningún lugar de la instalación. En caso contrario, habría que instalar un separador de aceite en la descarga del compresor [Wang, 2000].

Los aceites lubricantes pueden ser minerales o sintéticos. Los primeros son un subproducto del refinado del petróleo, tienen buena miscibilidad con los CFC y los hidrocarburos, pero empieza a tener problemas con los HCFC y, sobre todo, los HFC. Por este motivo, se investigaron los aceites lubricantes sintéticos, que se fabrican como producto de reacciones químicas. Los aceites alquibencénicos se crearon para ser miscibles con los HCFC, pero no lo son con los HFC. Para estos se emplean aceites poliolésteres, que se obtienen de una reacción de un alcohol con un ácido que produce agua y éster. Los aceites poliolésteres son miscibles con todos los refrigerantes existentes, pero al ser su reacción reversible, existe el riesgo de que el éster reaccione con un exceso de humedad en el sistema dando como resultado el alcohol y el ácido originales [Ernesto Rodríguez, 2005].

### 2.3.6. Reactividad.

Se debe seleccionar un refrigerante que no reaccione con los materiales empleados de la instalación [Wang, 2000]. Por ejemplo, el amoníaco reacciona con el cobre por lo que, no pueden emplearse con compresores herméticos o semiherméticos pues podría entrar en contacto con el bobinado del motor. Tampoco se recomiendan el uso de refrigerantes halogenados con aleaciones que contengan magnesio [Stoecker, 1998].

### 2.3.7. Capacidad frigorífica.

Dada una temperatura de evaporación, la capacidad frigorífica se calcula dividiendo el volumen específico en  $\text{m}^3/\text{kg}$  entre el calor latente  $\text{kJ}/\text{kg}$  en el evaporador. Se define como el caudal en  $\text{m}^3/\text{s}$  necesario para producir un efecto útil de 1 kW. Interesa que sea lo más bajo posible pues así la instalación se reduce de tamaño [Wang, 2000]. Aun así, teniendo en cuenta que la normativa regula en función de los kg de refrigerante que contenga la instalación, conviene que el calor latente sea lo más alto posible.

Por ejemplo, para una temperatura de 10°C, el calor latente de agua (R-718) es 2477  $\text{kJ}/\text{kg}$ , mientras que el del amoníaco es prácticamente la mitad (1226  $\text{kJ}/\text{kg}$ ), lo que significaría que para dar la misma potencia hace falta la mitad de caudal másico de agua que de amoníaco. Aun así, como el volumen específico del vapor es más de

500 veces mayor que el del amoníaco, se necesitan 250 veces más caudal volumétrico con agua que con amoníaco para dar la misma potencia.

En la Figura 4 se representa la capacidad frigorífica para los refrigerantes principales en función de la temperatura de evaporación manteniendo constante la temperatura de condensación en 40°C en un ciclo sin sobrecalentamiento ni subenfriamiento. El volumen específico se ha calculado en las condiciones de salida del evaporador, es decir, vapor saturado a temperatura de evaporación.

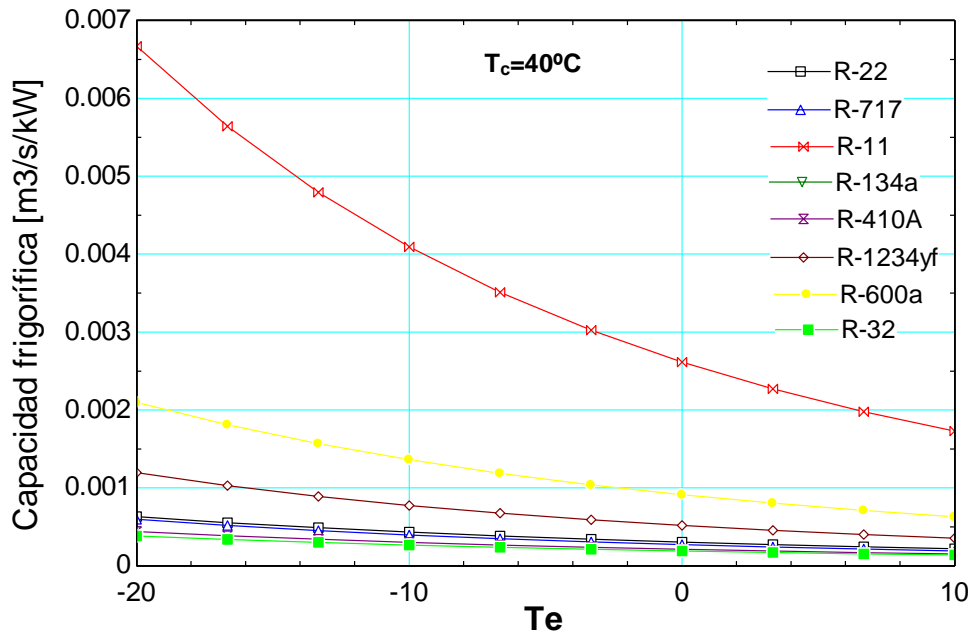


Figura 4. Capacidad frigorífica en función de la temperatura de evaporación para distintos refrigerantes

Se observa que el R-11 necesita un caudal casi un orden de magnitud superior al del resto de refrigerantes para dar la misma potencia. El resto de refrigerantes se encuentran en valores similares de capacidad frigorífica, siendo ligeramente mayor este parámetro en el R-600a y en el R-1234yf.

### 2.3.8. Conductividad térmica.

Como fluidos caloportadores que son los refrigerantes, interesa que tengan una alta conductividad térmica para así maximizar la eficiencia de la transmisión de calor. En última instancia es conveniente por razones de tamaño ya que unos altos coeficientes de transferencia implican menos área de transferencia [Wang, 2000].

### 2.3.9. Detección de fugas.

Las fugas deben poder identificarse con facilidad a fin de poder reparar la pérdida de refrigerante puesto que, si no se tiene control sobre la carga actual de refrigerante en la instalación o aparato, no se puede conocer la capacidad frigorífica disponible [Wang, 2000]. Como la mayoría de los refrigerantes halogenados son inodoros e incoloros las fugas se miden con algunos métodos como la espuma de jabón, los detectores de fuga electrónico o las lámparas ultravioletas [Ernesto Rodríguez, 2005].

### 2.3.10. Coste.

El coste puede ser el factor determinante para elegir un refrigerante frente a otro. Sin duda, el coste de refrigerantes naturales como el CO<sub>2</sub> o el amoníaco debe ser mucho menor que el de los refrigerantes sintéticos. Además, como se verá en el capítulo posterior, los HFC van a sufrir una escasez de oferta en los próximos años que hará aumentar su precio de venta en los próximos años. Los hidrocarburos se encontrarían a medio camino entre los HFC y los naturales.

Se han consultado algunas páginas webs en las que se venden gases refrigerantes para intentar estimar su precio. Desafortunadamente, la mayoría de distribuidores no muestran el precio en sus catálogos. Además, se ha observado una gran diferencia de precios para un mismo refrigerante. Finalmente, se ha optado por mostrar

(Tabla 1) el precio estimado para algunos refrigerantes del catálogo disponible en la web de Pecomark (2018). Hay que señalar que el precio por kg también depende de la capacidad del envase, por lo que los datos de la Tabla 1 solo pretenden dar una idea cualitativa que permita comparar un refrigerante frente a otro.

Tabla 1. Precio de los distintos refrigerantes [Fuente: Pecomark]

Refrigerante	Precio promedio	PCA
R-134a	106 €/kg	1430
R-410A	154 €/kg	2088
R-404A	238 €/kg	3922
R-407C	145 €/kg	1744
R-32	70 €/kg	675
R-1234ze(E)	72 €/kg	7
R-600a	33 €/kg	3
R-290	44 €/kg	3

En la Tabla 1 también se muestra el PCA de los refrigerantes. Se puede concluir que para los HFC el precio disminuye al disminuir el PCA. Por último, hay que señalar que los HFO como el R-1234ze(E), a pesar de tener un potencial de calentamiento atmosférico despreciable, tienen un precio bastante elevado que se debe a que son compuestos sintéticos fabricados en un laboratorio.

# 3 PROBLEMÁTICA

---

Ningún refrigerante se ha asentado de forma definitiva en alguna aplicación concreta. Esto no se debe a motivos técnicos, no es cuestión de que aparezca un nuevo refrigerante sintéticos con mejores propiedades que el anterior, de hecho, suele ocurrir lo contrario. Desde el principio se han usado los mejores fluidos, al menos desde un punto de vista termodinámico. Los problemas que han hecho que tengamos que pasar de una generación a otra, hasta en tres ocasiones, son de tipo medioambiental o de seguridad.

Este capítulo va a comenzar con una reseña histórica de los distintos refrigerantes utilizados en los dos últimos siglos de tecnología frigorífica, hasta llegar a la actual generación de HFC. Se pretenden describir los problemas que han obligado a su sustitución, así como las medidas adoptadas y cómo estas se han llevado a cabo.

En segundo lugar, se va a explicar el problema que existe actualmente con el calentamiento atmosférico y cómo repercute en los refrigerantes, y más concretamente, en la actual generación de HFC, mediante el Reglamento europeo F-Gas que plantea restricciones desde 2015 hasta 2030.

## 3.1. Evolución histórica de los refrigerantes

La primera definición de refrigerante la dio Oliver Evans en 1805. Él se percató de que a bajas presiones el punto de ebullición del dietiléter disminuía por debajo de la temperatura ambiente, permitiendo producir frío con su evaporación. Además, teorizó con la posibilidad de hacer circular dicho fluido por un circuito cerrado condensándolo usando un intercambiador de agua. Sin duda estas ideas debieron inspirar a Jacob Perkins, considerado el padre de la refrigeración, a describir por primera vez en su patente de 1834 un ciclo de compresión mecánica simple y a los refrigerantes tal y como los conocemos hoy en día (“fluido volátil con el propósito de producir frío y, a la vez, de condensar para poder ser reutilizado”) [Calm, 2008].

Entre 1830 y 1930 las sustancias usadas como refrigerantes fueron fluidos naturales, muy conocidos, con una alta volatilidad como el amoníaco, el agua, el dióxido de carbono, el dióxido de azufre, el ácido fórmico o hidrocarburos como el propano o el isobutano [Calm, 2008]. Todas estas sustancias, con excepción del agua que presenta dificultades tecnológicas, son tóxicas, inflamables o ambas. Algunas incluso eran altamente reactivas (como el ácido fórmico). Por esta razón, los accidentes estaban al orden del día. La inseguridad era tal que, como cuenta anecdóticamente Calm (2008), un anuncio de 1922 describía al propano como la alternativa segura e inodora del amoníaco a pesar de que hoy en día se encuentra clasificado dentro del grupo de baja seguridad debido a su alta inflamabilidad, mientras que el amoníaco es de seguridad media.

Con estas premisas, Willis Carrier y R. W. Waterfill llevaron a cabo en 1924 el primer análisis comparativo de refrigerantes, concluyendo que el 1,2-dicloroetileno era la sustancia más adecuada para su enfriadora de agua. Se descartó el CO<sub>2</sub>, sin estudiar los ciclos transcíticos, porque producían un mal rendimiento. También el amoníaco y el agua porque necesitaban muchas etapas de compresión. Se rechazó el SO<sub>2</sub> por razones de seguridad y el tetracloruro de carbono (R-10) por su reactividad con los metales [Calm, 2008]. Comenzaba así la búsqueda del refrigerante definitivo.

La industria de la ingeniería frigorífica necesitaba de un refrigerante que no fuera tóxico ni inflamable y con las características adecuada si quería extenderse a otros sectores, como el doméstico, y alcanzar la importancia en la sociedad que tiene hoy en día. Con este propósito, Midgley y Henne buscaron los compuestos más convenientes para ser usados como refrigerantes. Buscaban aquellas sustancias con un bajo punto de ebullición, nula reactividad y baja toxicidad e inflamabilidad. Concluyeron que el compuesto buscado debía estar formado por alguno de los siguientes elementos: carbono, oxígeno, nitrógeno, hidrógeno, sulfuro, bromo, cloro o flúor. Se dieron cuenta de que los refrigerantes utilizados hasta entonces tenían estos elementos, excepto uno: el flúor. En 1930, publicaron su estudio de cómo afectaba el cloro y el flúor en los compuestos orgánicos a su volatilidad, toxicidad e inflamabilidad [Calm, 2008].

Un año después se comercializó el primer refrigerante seguro, el R-12, mientras que el R-11 llegó en 1932. A

diferencia de sus predecesores, los CFC, y en la década de los 50 los HCFC, sí consiguieron llegar al mercado doméstico [Calm, 2008]. En los frigoríficos domésticos y para la climatización de los vehículos se empleó R-12, mientras que en la industria destacaron el R-22 y, como antes, el amoníaco. En sistemas de aire acondicionado doméstico también dominó el R-22. Por su parte, el R-502 (una mezcla a base del HCFC R-22 y del CFC R-115) se usaba ampliamente en el sector comercial [Stoecker, 1998].

F. S. Rowland y Mario Molina (1974) postularon en su artículo “Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone” la teoría del agotamiento de la capa de ozono. En general, las moléculas de  $O_3$  se destruyen y regeneran de forma continua e ininterrumpida en la estratosfera, absorbiendo radiación ultravioleta en dichos procesos [Ernesto Rodríguez, 2005], siguiendo el mecanismo descrito en las ecuaciones 3-1 y 3-2.



De esta forma, la capa de ozono es un filtro natural, pues nos protege de este tipo de radiación que puede causar cáncer de piel o ceguera, además de afectar negativamente a la vida vegetal y animal [Ernesto Rodríguez, 2005].

Según la teoría de Rowland y Molina (1974), los CFC y, en menor medida, los HCFC son lo suficientemente estables como para llegar a la estratosfera sin reaccionar previamente con otras sustancias, como no ocurre con el cloro emitido de forma natural. En esta capa de la atmósfera las moléculas de CFC y HCFC se disocian dejando un átomo de cloro libre, el cual actúa de catalizador de una reacción fatídica con el ozono (ecuaciones 3-3 y 3-4).



Como se observa, el átomo de cloro reacciona con la molécula de ozono dando lugar a una de oxígeno y a otra de monóxido de cloro con un radical libre que, en contacto con un átomo de oxígeno, los cuales existen de forma natural en la estratosfera como consecuencia de la reacción del ozono con la radiación ultravioleta (ecuación 3-1), producen otra molécula de oxígeno y un nuevo átomo de cloro. De esta manera el proceso podría repetirse, en teoría, de forma indefinida. De hecho, el oxígeno atómico consumido implica que otra molécula de ozono destruida por la radiación UV no podrá regenerarse (ecuación 3-2).

Las hipótesis de Rowland y Molina, que ganaron el premio nobel en 1995, fueron corroboradas en 1985 por las investigaciones hechas por los científicos de la base británica Halley, ubicada en la Antártida, que llevaron al descubrimiento del agujero de la capa de ozono dado el descenso continuo de las concentraciones de ozono en el polo sur. En 1988 se observó que los niveles de ozono en el círculo polar antártico eran un 30% inferiores a la de los años 70. Posteriormente, algunas exploraciones de la NASA en el polo sur encontraron residuos de CFC, justificando que éstos podían llegar a la Antártida aun estando los principales países productores en el hemisferio norte. Adicionalmente, algunas mediciones hechas en todo el mundo en la década de los 80 indicaban que la radiación ultravioleta había aumentado entre un 5-10% [Wang, 2001].

En 1989 entró en vigor el Protocolo de Montreal, el cual fue un acuerdo internacional para reducir la producción y el consumo de los gases clorados que destruyen la capa de ozono. Las sustancias controladas por el Protocolo se agrupan en los distintos anexos del mismo, correspondiéndoles a cada grupo unas medidas de control diferentes. Todas las reducciones que se indican a continuación están referidas al nivel básico de 1989, a excepción de para los HCFC. Las medidas son distintas para los países en vías de desarrollo, enumerados en el artículo 5 del Protocolo, llamados de ahora en adelante Partes del artículo 5. Por su parte, los países más desarrollados se llamarán Partes fuera del artículo 5.



Así, en el anexo A encontramos CFC con un muy elevado PAO tales como el R-11 o el R-12. Para las Partes fuera del artículo 5 se programó una primera reducción al 20% para 1993, una del 75% para 1994 y la definitiva para 1996. Para las Partes del artículo 5 la reducción al 100% se extendió hasta el 1 de enero de 2010.

En el anexo B se hallan otros CFC de menor potencial de agotamiento de ozono, como el R-13. Las reducciones fueron de diferente magnitud con respecto a la de las sustancias del anexo A, pero finalmente la reducción del 100% ocurrió el mismo año: en 1996 para las Partes fuera del artículo 5 y en 2010 para las Partes del artículo 5.

En el anexo C se agrupan los HCFC, como el R-22 y el R-124. Su calendario de eliminación era más relajado porque el PAO de estas sustancias es significativamente más bajo y porque se han utilizado como refrigerantes de transición hasta los actuales HFC, que son refrigerantes sin cloro. La reducción comenzó más tarde y, aun habiéndose acelerado en la revisión del 2007, hoy en día aún no ha terminado. El nivel básico se calculó para las Partes fuera del artículo 5 como el nivel de 1989 más 2.8% del consumo de CFC, mientras que para las Partes del artículo 5 como el promedio de 2009 y 2010. Para las Partes fuera del artículo 5 se estipularon reducciones del 35% para 2004, del 75% para 2010, del 90% para 2015 y del 100% para 2020. Se indica que en lo sucesivo el consumo de HCFC estará restringido al mantenimiento de equipos de refrigeración y aire acondicionado ya existentes. En cambio, para las Partes del artículo 5 se programó una reducción del 10% para 2015, del 35% para 2020, del 67,5% para 2025 y del 100% para 2030.

Otras medidas llevadas a cabo para frenar el efecto de agotamiento de la capa de ozono fueron impedir las emisiones deliberadas y evitar las fugas. Para las fugas se deben aumentar los controles y el sellado de los aparatos. Las emisiones deliberadas ocurren durante la fabricación, instalación, servicio y eliminación de los equipos que contienen estos gases, así como también durante los procesos de recuperación, reciclado y eliminación [Wang, 2001].

Desde la página web de la UNEP (2018) pueden consultarse los datos reportados por cada uno de los países en cuanto a consumo y producción de CFC y HCFC. Puede comprobarse que ninguna de las sustancias de los anexos A y B son consumidas en ningún lugar del mundo. Con respecto a los HCFC, en la Figura 5 se puede ver como su consumo aumentó a partir del abandono de los CFC en 1989. Su uso como sustituto siguió creciendo hasta 2004, cuando comenzaron las reducciones en los países más desarrollados. El crecimiento posterior hasta 2010 se debe, como se verá a continuación, al crecimiento de China. Actualmente nos encontraríamos en valores cercanos a los de 1995. El valor de 2017 no puede ser tenido en cuenta porque en la fecha de consulta tan solo 52 países habían reportado su consumo de HCFC de los 169 que lo hicieron en 2016.

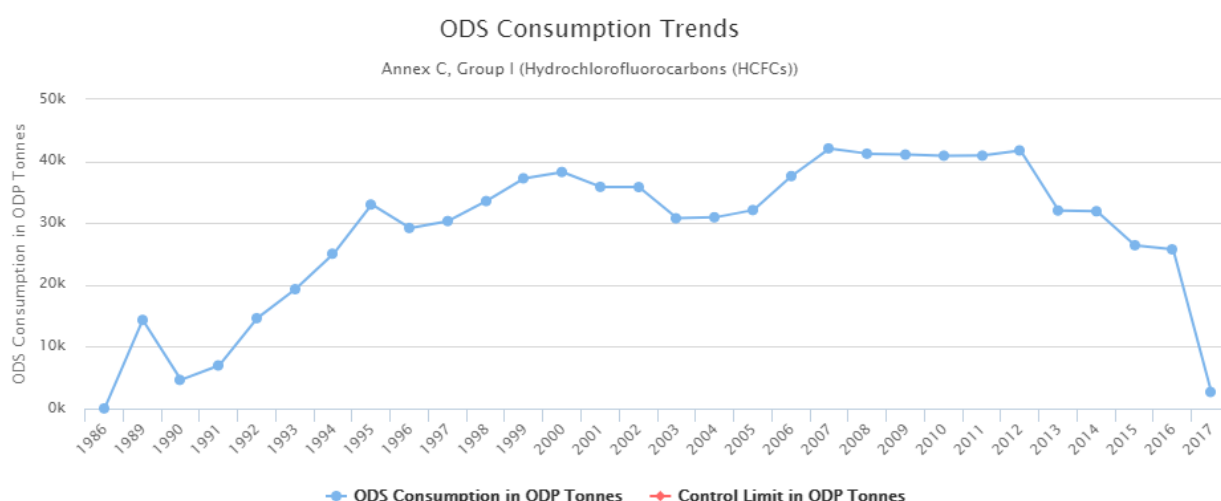


Figura 5. Evolución de los HCFC consumidos a nivel mundial

Algunas Partes acordaron un abandono más rápido que el marcado por el calendario. Este fue el caso de los países de la Unión Europea que dejaron de consumir HCFC en 2010. De hecho, atendiendo a la Instrucción Técnica IF-04 del Reglamento de Seguridad para Instalaciones Industriales (2011) de España, está prohibido el empleo de CFC y HCFC en instalaciones nuevas.

En otras potencias fuera del artículo 5 como Estados Unidos, Rusia o Canadá no ocurre lo mismo, sino que siguen lo programado por el Protocolo pudiéndose aún utilizar HCFC como el R-22. El caso de EE. UU. se

muestra en la Figura 6. A finales del siglo XX su consumo de HCFC era un cuarto del mundial y se observa cómo ha ido disminuyendo de acuerdo con los límites pactados.

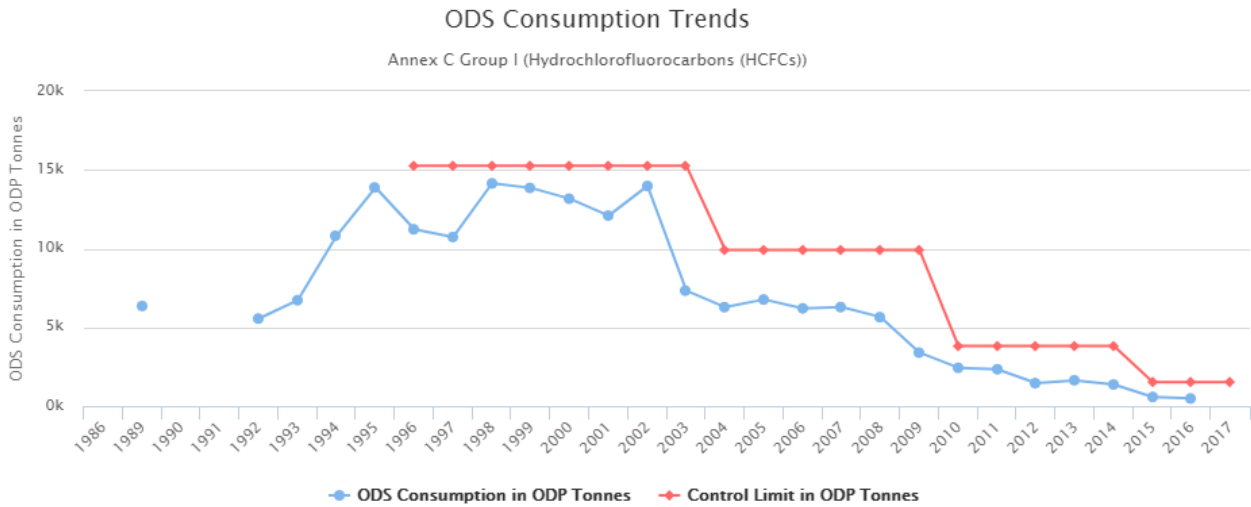


Figura 6. Evolución del consumo de HCFC en Estados Unidos

En la Figura 7 se muestra la evolución en China, que está dentro de las Partes del Artículo 5. En primer lugar, se observa que tanto el consumo como la producción ha crecido constantemente hasta la fecha de comienzo de las reducciones. De hecho, en 2009 y 2010, que es cuando se calcula el nivel básico, los valores eran máximos. Puede apreciarse, por un lado, que el consumo de China es equivalente a más de un 50% del consumo global total actual de HCFC y, por otro, que casi la totalidad de los HCFC consumidos en el mundo son producidos en este país.

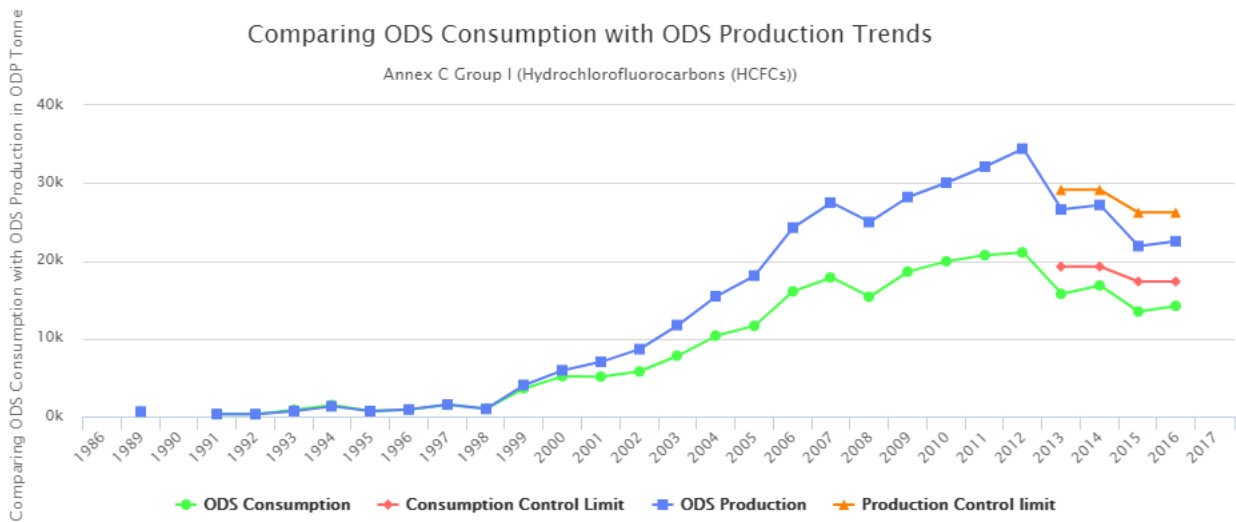


Figura 7. Evolución del consumo y producción de HCFC en China

El abandono de los HCFC está aún a medio camino porque, si bien es cierto que su fin tanto en la Unión Europea como en Estados Unidos es casi una realidad, estos dos bloques juntos solo significaban el 50% del consumo global de estas sustancias agotadoras de la capa de ozono con respecto a los valores máximos de 2010. Parece lógico que, en países en vías de desarrollo, con un consumo de HCFC inferior a las 1000 toneladas de ODP (PAO), puedan usarse estas sustancias hasta 2030 en aras de no dificultar su crecimiento y de darles un mayor margen para alcanzar el nivel tecnológico que puedan necesitar las futuras alternativas. No obstante, como se ha comentado, el consumo de HCFC de China representa más del 50% del de estos países, estando en siguiente lugar la República de Corea con un consumo un 90% inferior al primero. Por estas razones, parece que la desaparición de los HCFC va a ser más lenta y menos ecuaníme de cómo debería haber ocurrido.

## 3.2. Problemática gases de efecto invernadero

### 3.2.1. Gases de efecto invernadero

Los refrigerantes clorados (CFC) fueron sustituidos por los HCFC como refrigerantes de transición en los países más desarrollados. El objetivo era reemplazar a estos también por los HFC, considerados en ese momento como refrigerantes definitivos. Paradójicamente, tal y como señala Ciconkov (2017), los HFC fueron presentados por primera vez en 1992, el mismo año que se estableció la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC, por sus siglas en inglés) que finalmente establecería que los HFC deben ser también reemplazados.

El grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, en inglés) desarrolla desde 1990 informes de evaluación que sirven para la implementación de la UNFCCC. El quinto informe de evaluación fue publicado en 2014 y actualmente se encuentran trabajando en la sexta versión. Estos informes se dividen en tres grupos de trabajo: el primero de ellos trata los fundamentos científicos del cambio climático, el segundo estudia los impactos de este fenómeno y el tercero las formas de mitigación.

La radiación que llega a la Tierra procedente del Sol es emitida en longitudes de onda del espectro visible (380-780 nm). Esta radiación no tiene problema en atravesar los gases de la atmósfera, alcanzando la superficie terrestre. Para mantener el equilibrio, la Tierra devuelve la misma cantidad de radiación, pero en longitudes mayores, en el espectro infrarrojo, que sí son absorbidas por los gases de la atmósfera. El problema al que nos enfrentamos hoy en día es que la emisión descontrolada de ciertos gases, llamados gases de efecto invernadero, está afectando al equilibrio que ha existido en la atmósfera durante miles de años, modificando la distribución de energía en la atmósfera y entre la atmósfera y la superficie del planeta, llevando a un incremento de la temperatura [IPCC, 1995].

Los principales gases de efecto invernadero son el vapor de agua, el CO<sub>2</sub>, el metano, el ozono y los óxidos de nitrógeno. La quema de combustibles fósiles es el responsable de las emisiones de CO<sub>2</sub>, metano y vapor de agua, aunque este último también es emitido en las torres de refrigeración. Por su parte, los óxidos de nitrógeno se deben principalmente al uso de fertilizantes nitrogenados. Se estima que aproximadamente dos tercios del efecto invernadero natural es debido al vapor de agua. Aun así, la principal diferencia del vapor de agua con el resto de gases de efecto invernadero es que puede precipitar y condensar. La cantidad de agua que hay en el aire depende de su temperatura y no de las emisiones que se hagan desde la Tierra. Lo que sí es cierto es que esa cantidad aumenta con la temperatura, aproximadamente en un 7% por cada grado. Luego de forma indirecta, el calentamiento atmosférico conllevaría un aumento del vapor de agua. De cualquier manera, el vapor de agua solo tiene un efecto de retroalimentación del cambio climático estando este fenómeno bien acotado y estudiado, no debiéndose a las actividades humanas [IPCC, 2014].

Los expertos del IPCC afirman que las últimas tres décadas han sido las más cálidas de los últimos 1400 años. Se ha observado un aumento de la temperatura en las superficies tanto terrestres como oceánicas y un incremento de las concentraciones de los gases de efecto invernadero en la atmósfera. Estos informes intentan explicar la relación que pueda existir entre estos hechos y las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero [IPCC, 2014].

Si se mantienen las tendencias actuales, se estima que la temperatura promedio habrá crecido para 2100 entre 4 y 5°. Por estos motivos, se insta a aprobar nuevas políticas que consigan restringir la temperatura a un crecimiento controlado de un 2°C. Esto se conseguirá con concentraciones equivalentes para 2100 de 450 ppm, lo que podría necesitar reducir para 2050 en los países desarrollados las emisiones de gases de efecto invernadero entre un 80 y un 95% [IPCC, 2014].

Los sistemas naturales y humanos de todos los continentes y océanos sufren las consecuencias de los cambios en el clima. Se han observado una disminución de las temperaturas extremas frías, mientras que el número de días cálidos ha aumentado. Es incluso posible que el calentamiento haya aumentado la mortalidad humana relacionada con el calor y haya reducido la relacionada con el frío. También se advierte de un crecimiento del nivel del mar y de un aumento de las precipitaciones, lo que acarrea un cambio de los recursos hídricos de muchos sistemas naturales [IPCC, 2014].

Aun así, estos efectos no se distribuirán uniformemente por el planeta, afectando en mayor o menor medida a cada territorio geográfico. Por ejemplo, algunas especies están cambiando de distribución geográfica o

modificando sus pautas migratorias lo que dificultará la pesca en regiones sensibles, pero favoreciéndolo en otras. Algo similar ocurre con el cultivo de alimentos, la producción disminuirá debido al aumento de temperaturas, pero puede haber regiones que resulten beneficiadas [IPCC, 2014].

Además de los gases ya mencionados, el Protocolo de Kioto de 1997 incluyó dentro del conjunto de gases de efecto invernadero a controlar a los gases halogenados como los CFC, los HCFC y también a los actuales HFC. Esto parece tener sentido si comparamos los potenciales de calentamiento atmosférico (PCA). Mientras que el PCA del metano es 25 o el del  $N_2O$  es 265, el del CFC-12 era 10200, el del HCFC-22 1760 y el del HFC-134a es 1760. Es decir, son varios órdenes de magnitud mayor. Pero para comprender mejor el efecto real que tienen estos gases en el calentamiento atmosférico antropogénico hay que comparar las emisiones brutas. En la Figura 8 se observan cómo han evolucionado las emisiones de los gases de efecto invernadero y puede compararse el peso relativo de cada uno de ellos al estar expresados en las mismas unidades (Gt de  $CO_2$  equivalente). En 2010, la franja correspondiente a los gases fluorados (azul oscuro) equivalía a un 2% del total emitido, es decir, a unos 1000 Mt, de los cuales se estima que un 76% son HFC. El  $CO_2$  es el gas de efecto invernadero más importante con un 65% procedente de combustibles fósiles y un 11%  $CO_2$  debido a la silvicultura. Se observa que, aunque el PCA del metano sea 100 veces inferior al de los gases fluorados, su impacto es ocho veces mayor.

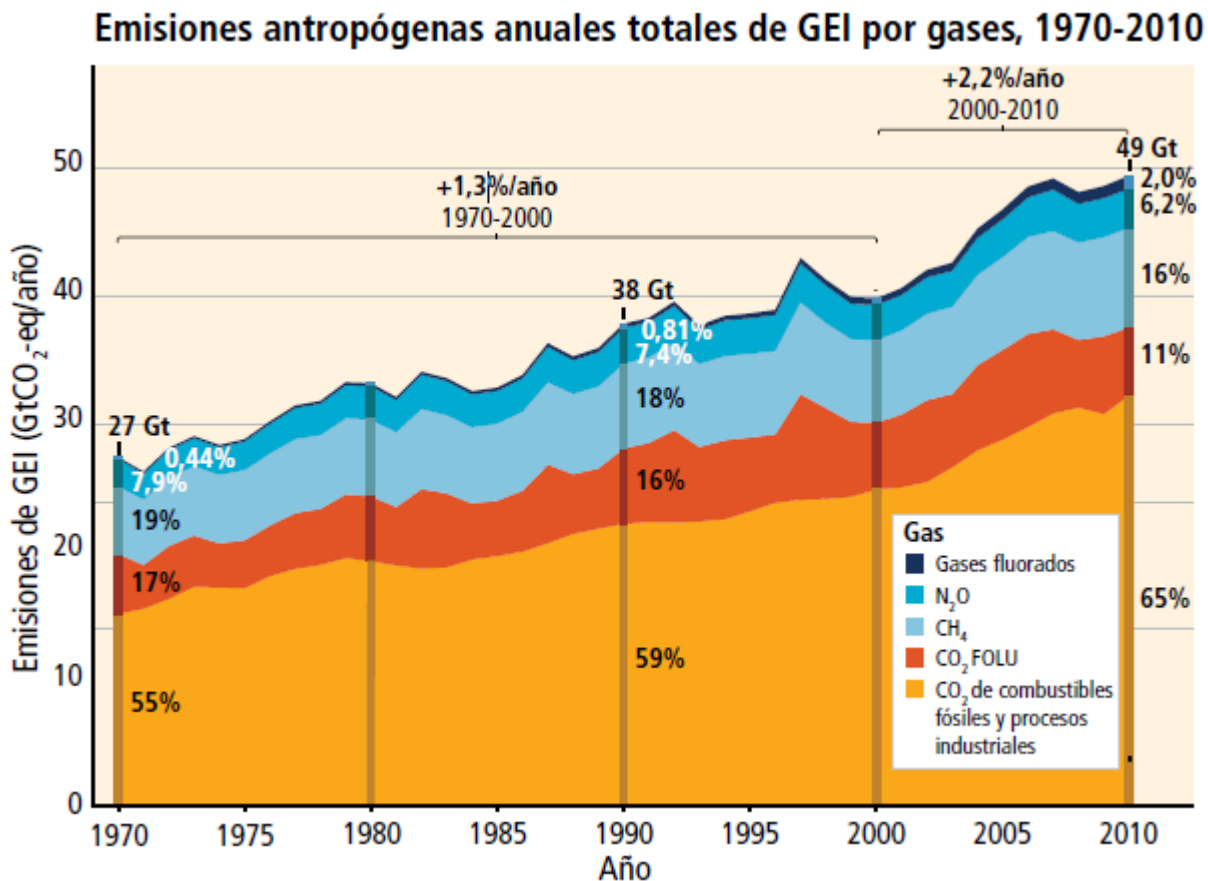


Figura 8. Evolución de las emisiones de los distintos gases de efecto invernadero (GHG) medidos en Gt de  $CO_2$  equivalentes [IPCC, 2014].

También es llamativo de la Figura 8 que, a pesar de la instauración de políticas de mitigación del cambio climático, las emisiones de estos gases siguen aumentando, observándose el mayor crecimiento entre 2000 y 2010 (2.3%). También se observa una tendencia de crecimientos en las emisiones de los gases fluorados, creciendo de 520 Mt en el año 2000 a 980 en 2010. La explicación reside en el continuo crecimiento demográfico y económico a nivel global.

En la Figura 9 se muestran las emisiones de gases de efecto invernadero por sector para el año 2010, distinguiendo entre emisiones directas e indirectas. Los principales responsables del 25% de emisiones indirectas son aquellos sectores que usan la energía final, es decir, los edificios (12%) y la industria (11%). En las emisiones directas, las actividades de silvicultura provocan el 24% de las emisiones totales, situándose en segundo lugar la

industria con un 21%, seguido del sector transporte con un 14% y de los edificios (6.4%). Las emisiones directas se deben a la quema de combustibles fósiles o a la emisión de metano, N<sub>2</sub>O o gases fluorados.

Con respecto a los HFC, las estimaciones de emisiones hechas por el IPCC en 2010 nos dicen que en el sector edificios de los 3136 Mt de CO<sub>2</sub> equivalentes alrededor de 117.6 Mt (3.75%) fueron HFC. En la industria las emisiones de HFC fueron 540 de 15443 Mt (3.5%) y en el sector transporte, los aparatos de climatización de los vehículos emitieron 151.2 de los 7000 Mt (2.16%). Por su parte, la EPA estima una emisión total de 1100 Mt de CO<sub>2</sub> equivalentes de HFC en el mundo a 2010, de las cuales un 79% son emisiones directas en sistemas de refrigeración o A/C, mientras que el resto son HFC empleados como disolventes o agentes extintores, entre otros. De ese 79%, la EPA cree que un 25% es refrigeración comercial en países desarrollados y un 15% refrigeración comercial en países en vías de desarrollo.

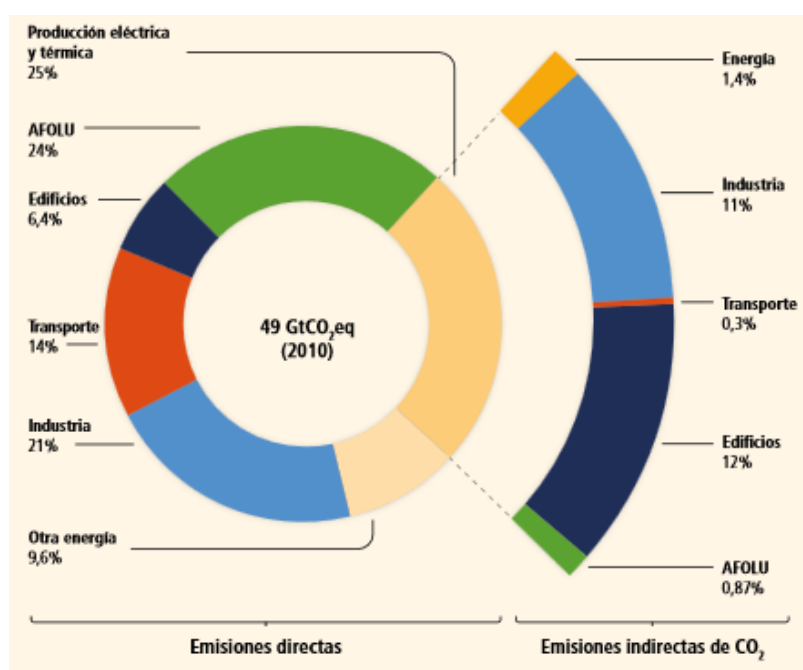


Figura 9. Emisiones de gases de efecto invernadero por sector en 2010 [IPCC, 2014].

De hecho, dentro de la tecnología frigorífica, y como ya se comentó en el apartado 2.3.1, el efecto indirecto asociado al consumo eléctrico es mayor que el efecto directo de gases fluorados. En la Figura 10 se muestran las emisiones directas e indirectas en Mt de CO<sub>2</sub> equivalentes a nivel mundial en el año 2010 (según estimaciones independientes a las del IPCC hechas por la Corporación Alemana para la Cooperación Internacional [GIZ PROKLIMA]) en los sectores de refrigeración doméstica, refrigeración comercial, refrigeración industrial, refrigeración en transportes, instalaciones fijas de climatización y sistemas móviles de climatización de vehículos. Se observa que las emisiones indirectas superan a las directas en todos los casos excepto en la refrigeración comercial. Aun así, el impacto indirecto total es casi el doble que el directo.

### 3.2.2. Reglamento 517/2014

Aunque las emisiones directas de gases fluorados supongan un impacto casi despreciable en el calentamiento atmosférico comparado con el resto de gases de efecto invernadero, la Comisión Europea decidió publicar en 2014 una actualización del Reglamento 842/2006 sobre los gases fluorados de efecto invernadero.

El objetivo de este Reglamento, más conocido como Reglamento F-Gas, es proteger el medio ambiente mediante la reducción de las emisiones de gases fluorados de efecto invernadero (en adelante, GFEI). Mediante la F-Gas se endurecen las normas sobre contención, uso, recuperación y destrucción de los gases fluorados con respecto al anterior Reglamento; se establecen nuevas condiciones a la comercialización de los aparatos que usen dichos gases y a usos específicos de estos gases; y se fijan límites cuantitativos a la comercialización de hidrofluorocarburos.

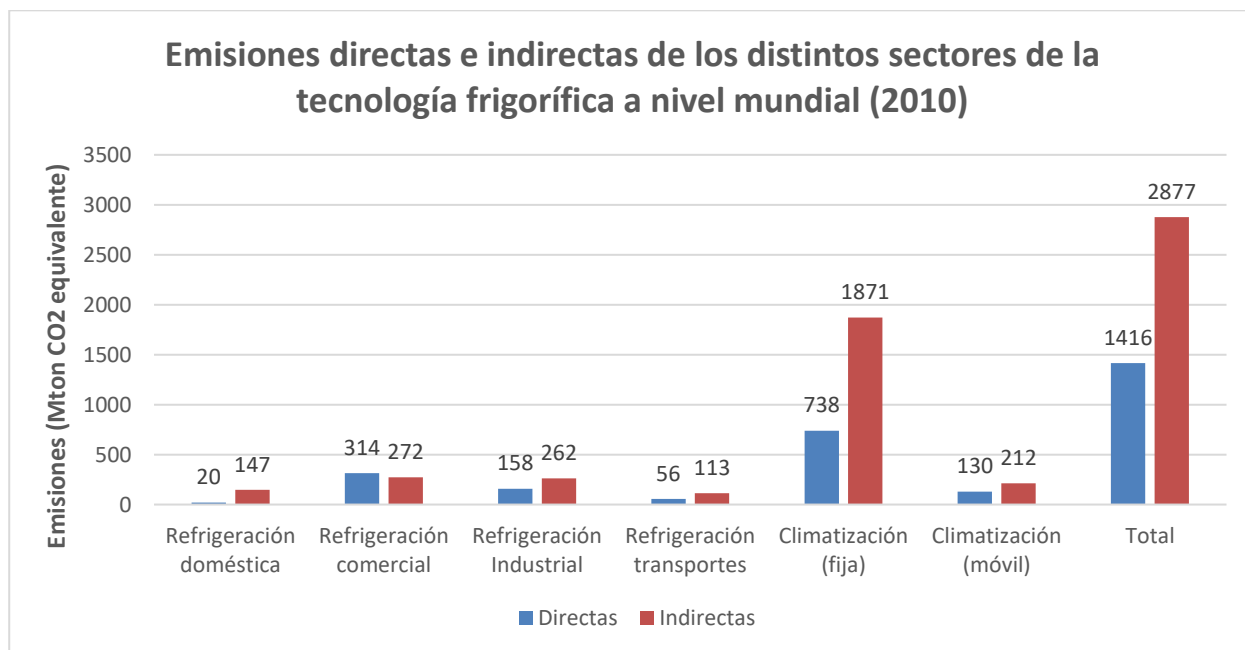


Figura 10. Comparación entre emisiones directas e indirectas en los distintos sectores de aplicación de la tecnología frigorífica

La Comisión del 26 de septiembre de 2011 sobre el anterior reglamento de GFEI, nº 842/2006, concluyó que en numerosos sectores se dispone de tecnologías alternativas competitivas a aquellas que emplean gases fluorados, lo que podría llegar a suponer una reducción para 2030 de dos tercios de las emisiones de 2010. Para incentivar esto, la comercialización de los siguientes productos relacionados directamente con las instalaciones frigoríficas estará prohibida en las fechas que se indican en la Tabla 2.

Estas restricciones afectan a números sectores, pues implicarán la inhabilitación de los refrigerantes más usados, tal y como indica Gas Servei (2018b) en su informe del Reglamento F-Gas:

En el sector del frío doméstico el R-134a (PCA 1430) no puede utilizarse ya en frigoríficos ni congeladores donde el PCA está limitada a 150.

En el sector comercial, el R-404A (PCA 3260) y el R-507 (PCA 3300) no podrán utilizarse a partir de 2020 para frigoríficos ni congeladores (PCA<2500). A partir de 2022 tampoco podrá usarse R-407C (PCA 1520) ni R-442A (PCA 1888) en estos aparatos (PCA<150). Para las centrales frigoríficas comerciales de las características que se mencionan en la tabla (PCA<150), no podrán usarse desde 2022 R-404A, R-407C o R-442A. Sí podrán seguir implementándose ciclos en cascada con R-134a en el circuito primario pues su PCA es inferior a 1500.

En los aparatos fijos de refrigeración (PCA<2500), no podrán utilizarse a partir de 2020 el R-404A (PCA 3260) o el R-507 (PCA 3300). No estarían prohibidos ni el R-407C, ni el R-410A (PCA 1720), ni el R-442A. Para aplicaciones a temperaturas inferiores a -50°C no habrá restricciones para los refrigerantes más usados, R-23 (PCA 11700) y R-508 (PCA 11850).

A partir del 1 de enero de 2020 tampoco se podrán emplear GFEI con PCA superior a 2500 para la revisión o el mantenimiento de los aparatos de refrigeración con un tamaño de carga superior a 40 toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub>, a excepción de si son equipos militares o los que su temperatura de evaporación sea inferior a -50°C, o si los GFEI empleados han sido regenerados o reciclados en cuyo caso estarán permitidos hasta 2030.

En climatización, los refrigerantes más utilizados son R-134a, R-407C y R-410A. Estarán prohibidos en los equipos portátiles de aire acondicionado a partir de 2020 (PCA<150) y desde 2025 en los Split con menos de 3 kg (PCA<750).

Tabla 2. Hoja de ruta de prohibiciones en la comercialización de GFEI

FECHA	PROHIBICIÓN
1 de enero de 2015	Frigoríficos y congeladores domésticos que contienen HFC con un PCA igual o superior a 150
1 de enero de 2020	Frigoríficos y congeladores para uso comercial (aparatos sellados herméticamente) que contienen HFC con un PCA igual o superior a 2500
1 de enero de 2020	Aparatos fijos de refrigeración que contengan HFC, o cuyo funcionamiento dependa de ellos, con un PCA igual o superior a 2500, excepto los aparatos diseñados para aplicaciones destinadas a refrigerar productos a temperaturas inferiores a $-50^{\circ}$
1 de enero de 2020	Aparatos portátiles de aire acondicionado para espacios cerrados (aparatos sellados herméticamente que el usuario final puede cambiar de una habitación a otra) que contienen HFC con un PCA igual o superior a 150
1 de enero de 2022	Frigoríficos y congeladores para uso comercial (aparatos sellados herméticamente) que contienen HFC con un PCA igual o superior a 150
1 de enero de 2022	Centrales frigoríficas de más de un compresor compactas, para uso comercial, con una capacidad igual o superior a 40 kW, que contengan gases fluorados de efecto invernadero, o cuyo funcionamiento dependa de ellos, con un PCA igual o superior a 150, excepto en los circuitos refrigerantes primarios de los sistemas en cascada, en que pueden emplearse gases fluorados de efecto invernadero con un PCA inferior a 1500
1 de enero de 2025	Sistemas partidos simples de aire acondicionado que contengan menos de 3 kg de gases fluorados de efecto invernadero o cuyo funcionamiento dependa de ellos, con un PCA igual o superior a 750

Serán excepciones de estas medidas los equipos militares y aquellos aparatos que debido a su mayor eficiencia energética las emisiones equivalentes totales de CO<sub>2</sub>, es decir, considerando fugas, recuperación y los efectos indirectos del consumo energético, durante su ciclo de vida sean menores que otro aparato que cumpliera los requisitos de diseño ecológico y no contuviera hidrofluorocarburos.

Aun así, en el apartado 3 del artículo 11 del Reglamento se contempla la posibilidad de conceder una prórroga excepcional de hasta cuatro años a alguna de estas prohibiciones, previa solicitud por parte de una autoridad competente del Estado a la Comisión, cuando se demuestre que no se dispone de alternativas técnicas viables y seguras o que éstas implican un coste desproporcionado.

A las anteriores hay que añadirle la prohibición de usar gases fluorados con un PCA superior a 150, en vigor desde 2017 mediante la directiva 2006/40/EC en los sistemas de climatización de los vehículos diseñados para el transporte de personas de hasta 8 plazas (excluido el conductor) y aquellos con masa de hasta 3.5 toneladas diseñados para el transporte de mercancías. Como consecuencia, el R-134a no puede ser usado en estas aplicaciones.

Con independencia de que algunos refrigerantes estén prohibidos en ciertas aplicaciones, desde 2015 está teniendo lugar una disminución progresiva de la cantidad máxima de hidrofluorocarburos que pueden comercializarse dentro de la UE, incluidos los contenidos en aparatos, que concluirán con una reducción al 21% para 2030. La cantidad comercializada de HFC es medida en toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub> a 100 años. No se contabilizarán los HFC importados a la Unión para ser destruidos, los directamente suministrados por un productor a empresas para ser exportados, los usados como materia prima o los destinados para uso militar. La cantidad máxima anual de HFC que el conjunto de productores e importadores de la Unión podrá comercializar resulta de multiplicar el porcentaje de la Tabla 3 corresponde al año en cuestión por la media anual de la cantidad total comercializada por la Unión entre 2009 y 2012.

Tabla 3. Porcentaje para calcular la cantidad máxima de HFC que pueden ser comercializados

Año	Porcentaje para calcular la cantidad de HFC máxima
2015	100%
2016-2017	93%
2018-2020	63%
2021-2023	45%
2024-2026	31 %
2027-2029	24 %
2030	21 %

Los valores de la Tabla 3 se han representado en la Figura 11. Se observa que la reducción más significativa ocurre en 2019.

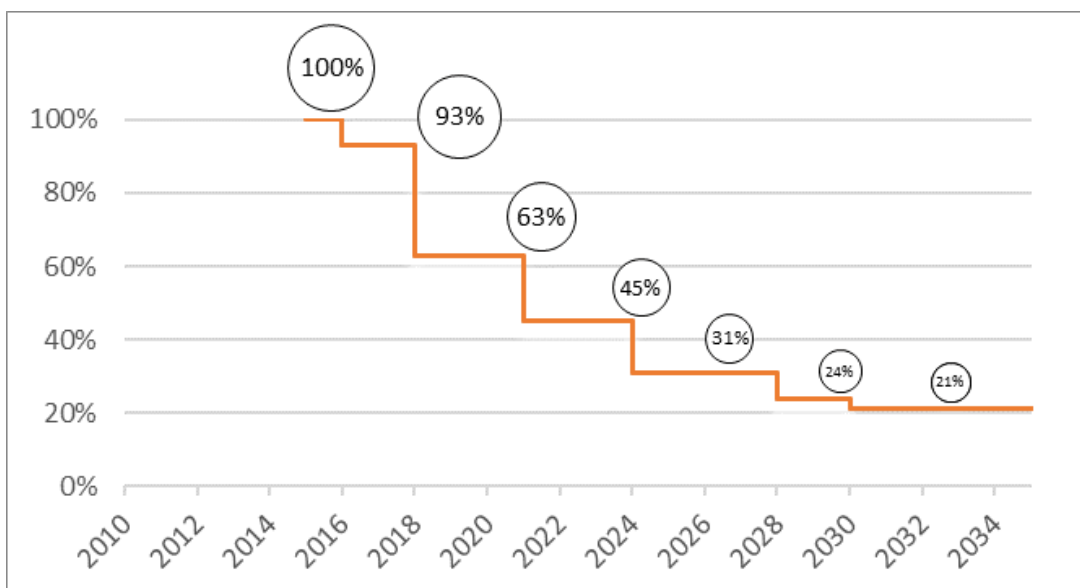


Figura 11. Porcentaje de reducción de la cantidad de HFC comercializables en la UE desde 2015

En su informe de 2014, BITZER estima que el valor medio de PCA de los HFC usados en la UE en ese año estaba entre 2200 y 2300. Esto implica que, de mantenerse las mismas cantidades de HFC en la UE, el PCA medio en 2030 será aproximadamente 500. Como se verá posteriormente, la mayoría de HFC con PCA menores de 500 presentan graves problemas de inflamabilidad o toxicidad y, consecuentemente, problemas legislativos que permitan su implantación.

Para controlar la cantidad de HFC comercializados se repartirán cuotas entre los productores e importadores. El proceso de asignación de cuotas está diseñado para no excluir a los pequeños operadores. De hecho, no tendrán limitaciones los productores de menos de 100 toneladas equivalentes al año. Tampoco las empresas farmacéuticas que los utilicen para la fabricación de inhaladores dosificadores.

Los productores o importadores que quieran continuar comercializando HFC tendrán asignado un valor de referencia correspondiente a la media anual declarada entre 2009 y 2012. La cuota de HFC que pueden comercializar en años posteriores se calculará multiplicando dicho valor de referencia por el porcentaje correspondiente al año en cuestión de la Tabla 3 y por 0.89:

$$\text{Cuota (1)} = 0.89 * \text{Valor Referencia} * \% \text{ año correspondiente}$$



La cantidad máxima que puede repartirse entre los nuevos productores o importadores corresponde a la diferencia entre el valor máximo que pueden comercializarse ese año y las asignaciones realizadas a las empresas que sí tienen un valor de referencia. La asignación se hará siguiente el siguiente procedimiento:

- Fase 1: se les concederá a estas empresas la cuantía solicitada siempre que no exceda la parte proporcional que les corresponde de la cantidad máxima que puede repartirse entre estas empresas, es decir:

$$\text{Cuantía Fase 1} \leq \frac{100}{n^{\circ} \text{ empresas Fase 1}} (\text{Cantidad Máxima} - \sum \text{Cuotas (1)})$$

- Fase 2: a las empresas que no hayan recibido el total de la cuantía solicitada, se les concederá la diferencia entre la cantidad solicitada y la cuantía obtenida en la fase 1, siempre que no exceda la parte proporcional que les corresponde de la cantidad máxima que puede repartirse entre estas empresas, es decir:

$$\text{Cuantía Fase 2} \leq \frac{100}{n^{\circ} \text{ empresas Fase 2}} * \text{Cantidad a asignar fase 2}$$

$$\text{Cantidad a asignar fase 2} = \text{Cantidad Máxima} - \sum \text{Cuotas (1)} - \sum \text{Cuantías Fase 1}$$

- Fase 3: se repetirá la fase 2 hasta que se satisfagan todas las solicitudes o hasta que la cantidad a asignar sea inferior a 500 toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub>.

Finalmente, para las empresas que sí tengan un valor de referencia pero quieran ampliar la cantidad de HFC que pueden comercializar se realizará un proceso similar al descrito para la asignación de las cuotas de nuevos productores o importadores, repartiendo la cantidad que queda de la máxima anual.

$$\text{Cantidad a asignar (3)} = \text{Cantidad Máxima} - \sum \text{Cuotas (1)} - \sum \text{Cuotas (2)}$$

A partir de 2018 las empresas con valor de referencia que soliciten una ampliación de cuota serán tratadas igual que las empresas sin cuota que la soliciten por primera vez.

Las empresas con cuota asignada podrán consultar la misma a través de un registro creado por la Comisión, en el que estarán obligados a inscribirse. A través del registro las empresas podrán transferir total o parcialmente su cuota a otro productor o importador. La única excepción es que las cuotas de la reserva, es decir, las asignadas a nuevas empresas, no pueden ser transferidas. Así se evita que empresas que no operen con HFC las soliciten gratuitamente solo para venderlas.

Por otro lado, desde 2017 no pueden ser comercializados los aparatos de refrigeración, aire acondicionado y bombas de calor cargados con HFC a no ser que dichos gases se computen dentro del sistema de cuotas.

De este modo, las empresas con cuota, ya sea asignada o transferida, podrán autorizar a otra empresa a utilizarla, por ejemplo, a los importadores de aparatos que contienen HFC que no hayan sido previamente comercializados en la UE. Las empresas de nuevo ingreso que quieran transferir sus cuotas deberán, además, demostrar que han suministrado físicamente los gases. El productor o importador que da la autorización se considera que ya ha comercializado esa fracción de HFC de ese año. Aun así, el importador de aparatos que recibe la autorización no tiene límite de tiempo utilizarla, pudiendo reservarla para años posteriores.

Según se indica en el informe de la Comisión sobre la evaluación del método de asignación de cuotas publicado el 13 de julio de 2017, se está considerando modificar el sistema de asignación de cuotas para permitir que los importadores de aparatos reciban su propia cuota. De esta manera se evitaría que algunos titulares de cuotas, que se recuerda se asignan gratuitamente, se beneficien con la concesión de autorizaciones.

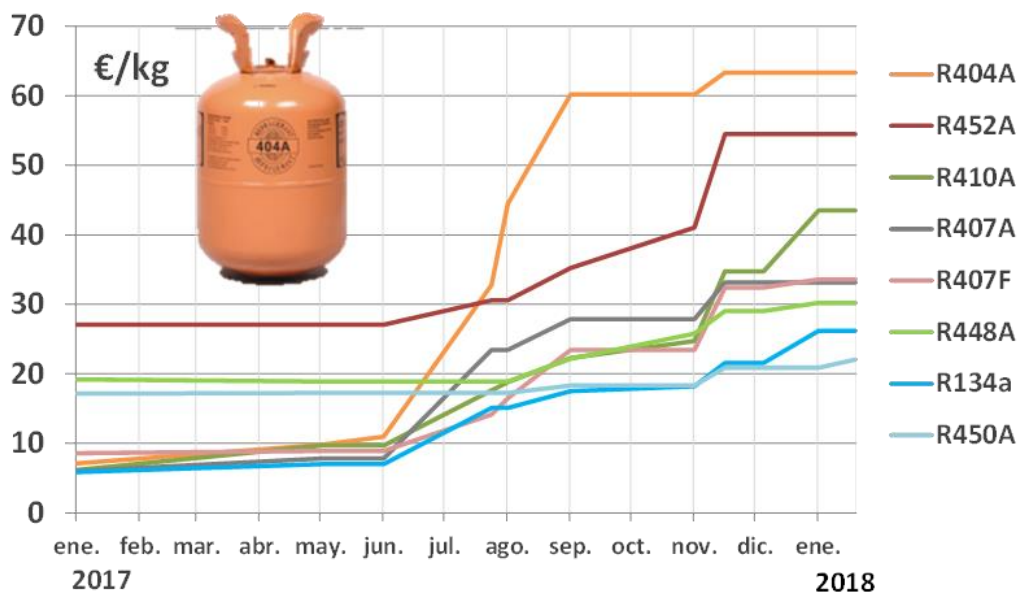


Figura 12. Incremento en los precios de los refrigerantes en 2017 [Fuente: INTARCON]

De hecho, tal y como indican INTARCON (2017), el precio de los principales refrigerantes se disparó el pasado verano de 2017 (Figura 12), con un incremento que es casi proporcional al PCA de los mismos. La culpa de este fenómeno la tiene dicho sistema de cuotas, que ha perturbado la libre competencia en el mercado y no ha evitado la especulación entre las grandes multinacionales de gases que poseen la gran mayoría de estos derechos de comercialización y los importadores de gas y de equipos precargados.

Otra de las razones que explican esta escalada de precios es que en China, principal fabricante de HFC en el mundo, disminuyó la producción debido a dificultades técnicas y al endurecimiento de las leyes de protección medioambientales [INTARCON, 2017].

Esta situación se prevé que empeorará año a año, al ir disminuyendo la cuota total de gases que pueden comercializarse en la UE y tras el compromiso internacional de reducir gradualmente los HFC acordado en Kigali el 15 de octubre de 2016 por representantes de 170 países [Rajecki, 2017].

### 3.2.3. El reglamento F-GAS en España.

El 17 de febrero de 2017 se publica en España el real decreto 115/2017, 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. Este real decreto armoniza el Reglamento 517/2014 de la UE con las distintas normas nacionales ya existentes, en cuanto a la comercialización y manipulación de los gases fluorados y la certificación de los operadores. Asimismo, deroga el anterior real decreto 795/2010.

Desde la entrada en vigor del Reglamento 517/2014, las tareas de instalación, revisión, mantenimiento, reparación, desmontaje, control de fugas y recuperación, pasa su posterior reciclado, regeneración o destrucción, de aparatos que contengan GFEI solo puede ser llevada a cabo por personas físicas que dispongan de los certificados correspondientes para tales operaciones. El real decreto 115/2017 especifica que dichos certificados personales acreditan a su titular de poseer las capacidades necesarias para desempeñar las actividades al que se refieren, pero no habilitan para la realización de dichas actividades, sino que los profesionales deben siempre ejercer dentro de una empresa habilitada. Por consiguiente, está prohibido que estas actividades las realicen empresas no habilitadas o cuyo personal no esté certificado. Los distintos tipos de certificados personales se recogen en el anexo I de este real decreto 115/2017 justo a las actividades que acreditan, entre los que se incluyen certificados para manipulación de equipos de sistemas frigoríficos fijos, sistemas de climatización de vehículos o equipos de protección contra incendios, entre otros.

En el mismo anexo I se indican las condiciones que debe cumplir el solicitante para que se le conceda el certificado. Estas condiciones incluyen haber recibido alguno de los programas formativos del anexo II impartidos en los centros formativos autorizados al respecto, disponer de algún carné, certificado profesional o

título de técnico superior, tener experiencia laboral o estar en posesión de algún título universitario.

Los centros formativos que pueden impartir los cursos formativos enumerados en el anexo II deben haber sido autorizados para ellos y pueden ser centros dependientes de las administraciones competentes en materia de formación profesional, centros y entidades de formación privados o centros de educación autorizados para impartir ciclos formativos. Los programas para la obtención de los certificados mencionados anteriormente deben incluir formación sobre la reglamentación aplicable, la prevención de emisiones, la recuperación de GFEI y la manipulación segura de los aparatos. Es obligatorio que también incluyan formación en tecnologías alternativas y la manipulación segura de estos gases sustitutivos, pues se ha constatado que la falta de conocimientos a este respecto dificulta su puesta en marcha. De hecho, atendiendo a la disposición adicional décima, aquellos profesionales que consigan el certificado de manera directa al acreditar algún título o certificado profesional también deberán cursar sobre tecnologías alternativas de manera complementaria.

Una de las medidas más relevantes de este real decreto afecta a los aparatos de aire acondicionado o bombas de calor precargados con gases fluorados que no estén herméticamente sellados, como por ejemplo un equipo Split. Estos solo podrán venderse al usuario final cuando se pruebe que la instalación será realizada por una empresa habilitada. Para ello el vendedor informará al comprador de esta obligación mediante el documento A disponible en el anexo VI. También entregará al comprador dos copias del documento B, en el anexo VI, el cual deberá remitir una de estas copias al vendedor en un plazo máximo de un año acreditando que la instalación se ha realizado por una empresa habilitada con profesionales certificados. De no cumplir con sus obligaciones, el comprador podría ser sancionado con una multa de hasta 20 000 € según corresponde a una sanción leve en la Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera.

El Reglamento 517/2014 incluye medidas de contención, endurecidas con respecto al anterior Reglamento 842/2006, para impedir las emisiones deliberadas y no intencionadas (es decir, fugas) de gases fluorados. La intención secundaria de las medidas de contención es establecer requisitos técnicos a las instalaciones de gases fluorados que hagan más atractivas las tecnologías alternativas.

En este sentido, el real decreto 115/2017 modifica el Reglamento de Seguridad para Instalaciones Frigoríficas en materia de control de fugas. Los operadores deberán someter a control de fugas los equipos que contengan, al menos, cargas equivalentes a 5 toneladas de CO<sub>2</sub>, a excepción de los aparatos sellados herméticamente cargados en cantidades inferiores a 10 toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub> y de la aparatación eléctrica que presente un índice de fugas inferior a 0.1 % anual, o que esté equipado con dispositivo de control de la presión o de la densidad, o que contenga menos de 6 kg de gases fluorados de efecto invernadero. En lo que respecta a la tecnología frigorífica solo se aplicará estas prescripciones a los operadores de aparatos fijos de refrigeración, aparatos fijos de aire acondicionado, bombas de calor fijas y unidades de refrigeración de camiones y remolques frigoríficos, aunque también afecta a los aparatos fijos de protección contra incendios, la aparatación eléctrica o los ciclos de Rankine con fluido orgánico.

La frecuencia de los controles de fugas se hará en función de la carga de gases fluorados y de si se dispone o no de sistemas de detección de fugas, según se indica en la Tabla 4.

Tabla 4. Frecuencia mínima de control de fugas

Toneladas equivalentes de CO <sub>2</sub>	Frecuencia mínima sin detector de fugas	Frecuencia mínima con detector de fugas
5-50	12 meses	24 meses
50-500	6 meses	12 meses
>500	3 meses	6 meses

Por su parte, los sistemas de detección de fugas son obligatorios para los aparatos fijos de refrigeración cuya carga sea al menos de 500 toneladas equivalentes de dióxido de carbono.

Para promover el control y reparación de fugas en lugar de la mera reposición de refrigerantes se creó en España, a raíz del artículo 5 de la ley 16/2013, un impuesto a los GFEI empleados para la recarga de equipo. El tipo impositivo se obtiene de multiplicar el PCA [kg equivalentes CO<sub>2</sub>/kg GFEI] por el coeficiente 0.020 [€/kg

equivalente CO<sub>2</sub>] con un máximo de 100 €/kg GFEI. Para gases reciclados o regenerados el impuesto es el resultado de multiplicar la tarifa anterior por 0.85. No están sujetos a este impuesto aquellos gases con un PCA igual o inferior a 150. Las empresas podrán recuperar parte del impuesto si entregan el gas al final de su vida útil para su reciclado, regeneración o destrucción.

En el Proyecto de Ley de Presupuestos Generales del Estado para el año 2018 se recoge una modificación del impuesto antes mencionado. El tipo impositivo se obtendrá aplicando el coeficiente 0.015 en lugar de 0.02, manteniendo el máximo de 100 €/kg, pero eliminando la exención de los GFEI con PCA igual o inferior a 150. En cuanto a los gases reciclados o regenerados en lugar de 0.85 se multiplicará la tarifa por 0.5 [Gas Servei, 2018a)].

Los distribuidores de gases fluorados solo podrán cederlos o venderlos a empresas habilitadas o fabricantes de equipos para su utilización como refrigerante, agente extintor, disolvente o para equipos de conmutación de alta tensión. También se podrán ceder o vender gases fluorados a los centros de investigación. Solo las distribuidoras de refrigerantes fluorados, las empresas habilitadas y los fabricantes de equipos podrán tener contenedores de estas sustancias destinados al transporte y almacenamiento.

En cuanto a las emisiones procedentes de instalaciones industriales, se podrían establecer valores límites de emisiones de acuerdo con la Ley 34/2007, de 15 de noviembre, o mediante una autorización ambiental integrada, en aquellas instalaciones reguladas por la Real Decreto Legislativo 1/2016, de 16 de diciembre. En este real decreto se apuesta por imponer requisitos técnicos a las instalaciones para evitar las emisiones de gases fluorados. Por ejemplo, se deben prevenir las emisiones accidentales durante su producción de los gases fluorados y de los subproductos formados o, en el caso de las plantas de tratamiento de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, se establece la obligatoriedad de recuperar el 99% de los HFC contenidos en los equipos.

Para verificar los avances hacia la consecución de los objetivos se hace fundamental mejorar las estimaciones sobre las emisiones de gases fluorados de efecto invernadero. Para ello el real decreto 115/2017 crea un registro público, tanto comunitario como nacional, que incluye una sección de certificados expedidos, otra que recoja el listado de centros formativos y evaluadores, y una última sección que permita supervisar las operaciones de cesiones y ventas entre distribuidores y empresas habilitadas realizadas con gases fluorados.

# 4 ANÁLISIS DEL REGLAMENTO DE SEGURIDAD PARA INSTALACIONES FRIGORÍFICAS

---

El artículo 1 del Reglamento de Seguridad para Instalaciones Frigoríficas dice textualmente que “constituye el objeto del presente reglamento el establecimiento de las condiciones que deben cumplir las instalaciones frigoríficas en orden a garantizar la seguridad de las personas y los bienes, así como la protección del medio ambiente”. Lo importante de esta afirmación es que el RSIF reconoce que las instalaciones frigoríficas pueden repercutir negativamente en el medio ambiente, equiparando su protección a la seguridad de las personas.

En este capítulo se van a explicar las limitaciones que el RSIF impone a los refrigerantes y a los sistemas e instalaciones frigoríficas. Se quiere comprobar si las directrices de este Reglamento, aprobado en 2011, permite el uso de refrigerantes alternativos a los HFC para algunas de las principales aplicaciones de la tecnología frigorífica. Los principales refrigerantes candidatos a sustituir a los HFC son el HFC R-32, las HFO R-1234yf y R-1234ze(E), el amoníaco (R-717), el CO<sub>2</sub> (R-744) y los hidrocarburos, propano (R-290) e isobutano (R-600a). Como representantes de los HFC usados hoy en día se han tomado el R-134a y el R-410A.

Los equipos escogidos para este estudio han sido: equipos compactos pequeños muy comunes utilizados para la refrigeración doméstica (frigoríficos y congeladores) y para la climatización en viviendas (aires acondicionados portátiles), equipos partidos de aire acondicionado para viviendas (Split), equipos compactos de aire acondicionado para pequeños comercios (compactos horizontales), equipos rooftop para supermercados, sistemas autónomos de climatización VRV que necesitan grandes cargas de refrigerante y, por último, equipos compactos de gran tamaño como son las enfriadoras de agua utilizadas en climatización. Como puede verse, a excepción de los frigoríficos y congeladores domésticos, el resto de casos de estudios pertenecen al sector de la climatización.

En último lugar, se comparará el proyecto de real decreto que pretende aprobar un nuevo Reglamento, hecho público en abril de 2018, con el RSIF actual para ver si es más permisivo o no con los refrigerantes alternativos.

## 4.1. Real decreto 138/2011

El Reglamento de Seguridad para Instalaciones Frigoríficas fue aprobado el 4 de febrero de 2011 mediante el real decreto 138/2011. Consta de seis capítulos y de diecinueve instrucciones técnicas complementarias.

La decisión de qué refrigerantes pueden usarse y en qué cantidades según la aplicación se toma a partir de lo indicado en la instrucción IF-04 *Utilización de los diferentes refrigerantes*. Dicha instrucción se vale de las clasificaciones hechas en el capítulo II del RSIF a los refrigerantes, a los sistemas frigoríficos y a los locales.

### 4.1.1. Clasificaciones previas a la determinación de la carga máxima de refrigerante

El artículo 4, y la instrucción IF-02 *Clasificación de los refrigerantes* donde se desarrolla, es uno de los más importantes para nuestro estudio. En él se clasifican los refrigerantes según su toxicidad e inflamabilidad y se define para cada uno de ellos su límite práctico, su potencial de calentamiento atmosférico (PCA) y su potencial de agotamiento de la capa de ozono (PAO), entre otros parámetros. La tabla del apéndice I de dicha instrucción IF-02 ha sido ampliada en varias ocasiones por resoluciones posteriores para incluir nuevos refrigerantes o mezclas que han ido apareciendo en el mercado desde 2011 como el R-1234ze(E).

Según su toxicidad, el RSIF divide a los refrigerantes en dos categorías:

- A. No produce efectos adversos para la mayoría de trabajadores que puedan estar expuestos al refrigerante durante una jornada laboral de 8 horas diarias y 40 horas semanales y cuyo valor es igual o superior a una concentración media de 400 ppm [v].

- B. No produce efectos adversos para la mayoría de trabajadores que puedan estar expuestos al refrigerante durante una jornada laboral de 8 horas diarias y 40 horas semanales y cuyo valor es inferior a una concentración media de 400 ppm [v].

Según su inflamabilidad, el RSIF considera tres posibilidades atendiendo al límite inferior de inflamabilidad:

1. No inflamables a cualquier concentración en el aire.
2. Inflamables cuando forman una mezcla con el aire igual o superior al 3.5% en volumen.
3. Inflamables cuando forman una mezcla con el aire inferior a 3.5% en volumen.

De esta manera, todos los refrigerantes se pueden ubicar en alguna de las seis clases de seguridad que aparecen en la Tabla 5.

Finalmente, cada clase de seguridad queda dentro de uno de estos tres grupos:

- GRUPO L1, o alta seguridad, solo los pertenecientes al grupo A1.
- GRUPO L2, o media seguridad, los pertenecientes a los grupos A2, B1 y B2.
- GRUPO L3, o baja seguridad, los pertenecientes a los grupos A3 y B3.

En el caso de las mezclas de refrigerante, su inflamabilidad y su toxicidad pueden variar debido al cambio de composición por fraccionamiento. Se les asignará una doble clasificación separada por una barra oblicua, la primera la de la composición original y la segunda será la de la composición más desfavorable en cada caso.

Tabla 5. Clases de seguridad real decreto 138/2011

		Grupo de seguridad	
Inflamabilidad creciente ↑ ↑	Altamente Inflamable	A3	B3
	Ligeramente Inflamable	A2	B2
	No inflamable	A1	B1
		Baja Toxicidad	Alta Toxicidad
		→ → Toxicidad creciente	

El límite práctico ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) establecido en este real decreto para cada refrigerante se define como la concentración máxima admisible en un local habitado, considerando conjuntamente la inflamabilidad y la toxicidad de la sustancia.

Los artículos 6, 7 y 8 clasifican respectivamente a los sistemas de refrigeración según su tipo y su emplazamiento, los locales según su acceso y las instalaciones frigoríficas según su riesgo potencial.

1. Tipo de sistemas (Figura 13).

1.1. Sistema directo: no hay fluido secundario sino contacto directo entre el sistema de refrigeración y el medio a enfriar o calentar (p.ej. congelador, aire acondicionado).

1.2. Sistema indirecto: hay un fluido secundario.

1.2.1. Sistema indirecto abierto: el fluido secundario se pone en contacto directo con el medio (p.ej. sistema autónomo con descarga a través de conductos).

- 1.2.2. Sistema indirecto abierto ventilado: el evaporador/condensador está en un recinto abierto o ventilado.
- 1.2.3. Sistema indirecto cerrado: el fluido secundario circula en un circuito cerrado (p.ej. un sistema centralizado con fan-coil).
- 1.2.4. Sistema indirecto cerrado ventilado: el evaporador/condensador está en un tanque abierto ventilado.
- 1.2.5. Sistema doble indirecto abierto: el fluido secundario circula en circuito cerrado intercambiando calor con un tercer fluido que se pone en contacto directo con el medio a tratar (p.ej. un sistema centralizado todo aire).

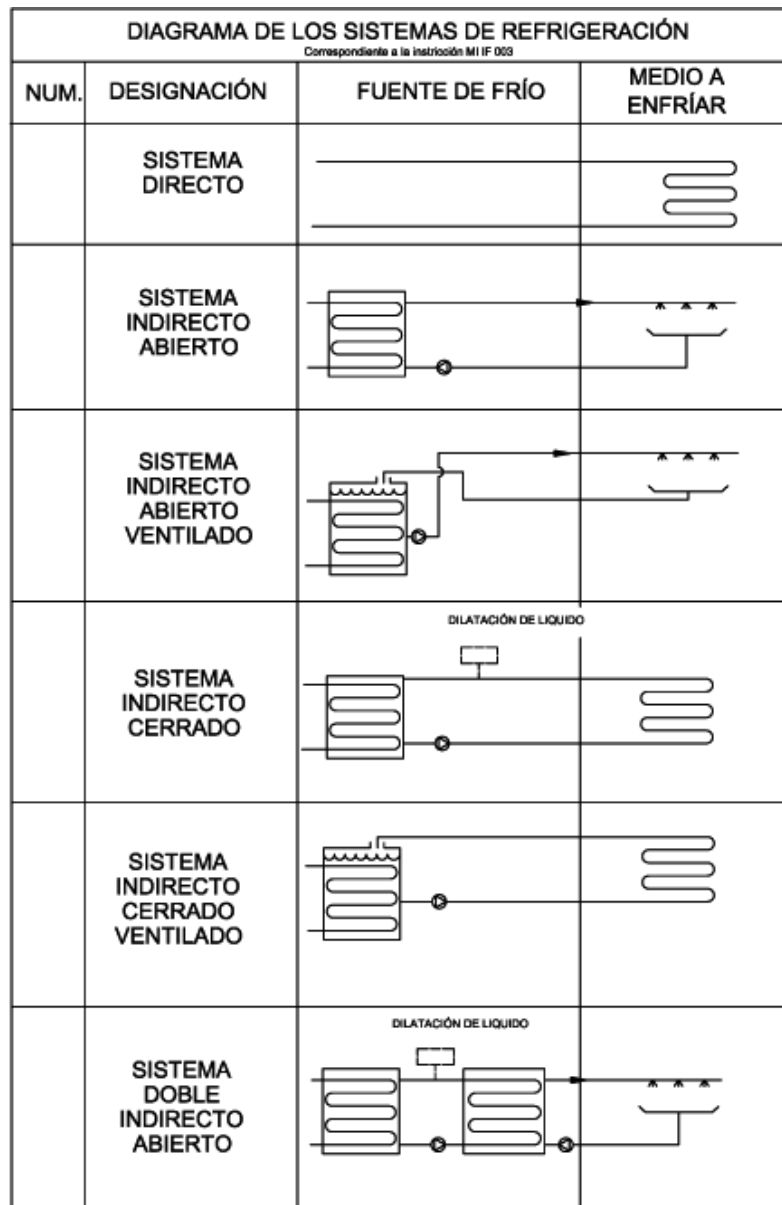


Figura 13. Clasificación de los sistemas de refrigeración

- 2. Tipo de emplazamiento del sistema frigorífico.
  - 2.1. Tipo 1: sistema de refrigeración instalado en un espacio ocupado por personas, no considerado como una sala de máquinas específica.
  - 2.2. Tipo 2: sistema de refrigeración con el sector de alta presión instalado en una sala de máquinas específica o al aire libre. No obstante, esta definición se aclara en la guía técnica que acompaña al

Reglamento, al considerarse imprecisa. En lugar del sector de alta en general, basta con tener instalado en una sala de máquinas específica o al aire libre los compresores y recipientes (acumuladores).

2.3. Tipo 3: sistema de refrigeración con todas las partes que contienen refrigerantes situado en una sala de máquinas específicas o al aire libre.

### 3. Categoría del local.

3.1. Categoría A: locales que pueden estar abiertos al público y ocupados normalmente por personas con capacidad limitada de movimiento para responder ante una emergencia (p.ej. hospitales, asilos o prisiones...).

3.2. Categoría B: locales en los que se puede pernoctar, locales en los que no se controla el número de personas o locales a los que puede acceder personas no familiarizadas con las medidas de seguridad (p.ej. viviendas, teatros, centros de enseñanza, centros comerciales...).

3.3. Categoría C: locales en los que se limita el número de ocupantes y alguno conoce las medidas de seguridad (p.ej. oficinas, laboratorios, lugares de trabajo en general...).

3.4. Categoría D: locales cerrados al público y locales a los que solo puede acceder personas autorizadas, familiarizadas con los protocolos de seguridad (p.ej. cámaras frigoríficas, fábricas, áreas restringidas de supermercados...).

### 4. Clasificación de las instalaciones frigoríficas.

4.1. Nivel 1: instalaciones que usen refrigerantes del grupo L1, formada por uno o más sistemas frigoríficos independientes con una potencia instalada en cada sistema inferior o igual a 30 kW siempre que la potencia total instalada no superé los 100 kW, o por equipos compactos de cualquier potencia. No pueden refrigerar cámaras de atmósfera artificial.

4.2. Nivel 2: instalaciones que usen refrigerantes de los grupos L2 o L3, o formadas por uno o más sistemas frigoríficos independientes con una potencia instalada en cada sistema superior a 30 kW o con una potencia total instalada superior a los 100 kW, o que enfríen cámaras de atmósfera artificial.

#### 4.1.2. Determinación de la carga máxima de refrigerante

La premisa para el cálculo de la carga máxima de refrigerante es que el límite práctico no debe ser inferior al cociente entre la carga de refrigerante del equipo y el volumen del local más pequeño ocupada por personas en el que se ubiquen partes del sistema con carga de refrigerante, aunque los límites pueden ser más restrictivos.

La determinación de la carga máxima se hace de acuerdo con la tabla A del apéndice 1 de la instrucción técnica IF-04. A dicha tabla se entra conociendo la categoría del local, el grupo de seguridad del refrigerante empleado, el tipo de sistema distinguiendo únicamente entre directo/indirecto abierto u otros sistemas indirectos y el tipo de emplazamiento del sistema. No obstante, hay que tener presente que el artículo 2 establece unos mínimos de carga, por debajo de los cuales, los sistemas están exentos de las limitaciones del Reglamento, que son 2.5 kg para refrigerantes L1, 0.5 kg para refrigerantes L2 y 0.2 kg para refrigerantes L3. Tan solo habría que puntualizar que si el equipo no es compacto habría que cumplir el artículo 21 relativo a la gestión de la documentación durante la puesta en marcha.

De cualquiera manera, es necesario matizar que, tal y como explican en la guía técnica de este Reglamento, aunque estén excluidos los sistemas, no ocurre lo mismo con la instalación de los mismos. De este modo, para poder instalar un equipo con refrigerantes L2 o L3 sería necesario cumplir con los estrictos (e incluso prohibitivos) requisitos de una instalación de Nivel 2.

Las instalaciones de Nivel 2 solo pueden ser llevadas a cabo por empresas frigoristas de Nivel 2. Según el artículo 11 estas empresas deben poseer en plantilla al menos a un técnico titulado con atribuciones específicas, además de tener suscrito un seguro de responsabilidad civil por un importe mínimo de 900 000€. Las empresas de Nivel 1 solo necesitan tener a un profesional frigorista y un seguro de 300 000€. En cuanto a la ejecución del proyecto, las instalaciones de Nivel 2 requieren de la redacción de un proyecto en un lugar de una breve memoria descriptiva, como corresponde a las instalaciones de Nivel 1. Además, la ejecución se debe hacer bajo la dirección de un técnico titulado competente en funciones de director de instalaciones. Finalmente, el titular de una instalación de Nivel 2 está a obligado a tener suscrito un seguro de responsabilidad civil de al menos



500 000€, lo cual no es necesario para las de Nivel 1

A continuación, se comentan las posibilidades de cada refrigerante según su grupo de seguridad.

- REFRIGERANTE GRUPO L1:

Según lo dispuesto en el artículo 2 del reglamento, no tendrán ninguna restricción los sistemas de refrigeración compactos con cargas inferiores a 2.5 kg ni los sistemas de refrigeración no compactos con cargas inferiores a 2.5 kg, que solo deben aplicar el artículo 21 relativo a la gestión de la documentación durante la puesta la marcha.

En locales de categoría A y el locales de categoría B, si el sistema es directo o indirecto abierto no ventilado (los ventilados son técnicamente inadecuados) la carga máxima será el producto del límite práctico en kg/m<sup>3</sup> del refrigerante por el volumen de cálculo, definido en el RSIF, como el “correspondiente al espacio más pequeño ocupado habitualmente por personas, en donde estén emplazados componentes que contengan refrigerantes”, tanto si el sistema es instalado en un espacio ocupado por personas o con el sector de alta en una sala de máquinas específica o al aire libre. No habrá limitación de carga si se instalan todas las partes que contengan refrigerante en una sala de máquinas específica o al aire libre. El resto de sistemas indirectos no tendrán limitación de carga en ningún caso.

En locales de categoría C y D no habrá restricción de carga excepto en sistemas directos o indirectos abiertos no ventilados en sótanos o en pisos superiores sin salidas de emergencias adecuadas, en cuyo caso la carga máxima será el producto del límite práctico por el volumen más pequeño normalmente ocupado por personas donde haya partes con refrigerante.

- REFRIGERANTE GRUPO L2:

Los refrigerantes de este grupo están prohibidos para su uso en acondicionamiento de aire o calefacción de bienestar en sistemas directos (p.ej. un Split) y en sistemas indirectos abiertos (ventilados o no) (p.ej. un rooftop), excepto en sistemas de refrigeración compactos (p.ej. un aparato de aire acondicionado portátil) si la carga es inferior a 0.5 kg (artículo 2.3.c), ya que a esos sistemas no aplica el reglamento, o en sistemas de refrigeración no compactos (p.ej. el Split antes mencionado) con carga inferior a 0.5 kg (artículo 2.2.b), en cuyo caso solo aplicará el artículo 21 relativo a la gestión de la documentación durante la puesta en marcha.

En locales de categoría A (hospitales, residencias de ancianos, cárceles...) si el sistema es directo o indirecto abierto (ventilado o no) entonces deberán ser siempre sellados y la carga máxima será el 50% del producto del límite práctico por el volumen del local más pequeño ocupado por personas sin que se sobrepasasen los 2.5 kg de carga, excepto si todo el sistema se encuentra en una sala de máquinas específicas o al aire libre, en cuyo caso la carga máxima será el producto del límite práctico por el volumen del local más pequeño ocupado por personas, manteniendo el límite superior de 2.5 kg. No habrá limitación de carga si el sistema es indirecto cerrado (p. ej. una enfriadora de agua con fan-coil en los locales) o sistema doble indirecto abierto (p.ej. una enfriadora de agua para una climatizadora) si se sitúan con, al menos, el sector de alta presión en una sala de máquinas específica o al aire libre, sin conexión directa con recintos de categoría A o B y con una salida al aire libre. En cualquier otro caso, la carga será la indicada anteriormente para sistemas directos e indirectos abiertos.

En locales de categoría B (viviendas, salas de espectáculos, colegios...) si el sistema es directo o indirecto abierto (ventilado o no) entonces serán siempre sellados y la carga será el producto del límite práctico por el volumen del local más pequeño ocupado por personas sin que se sobrepasasen los 2.5 kg de carga. No habrá limitación de carga si el sistema es indirecto cerrado o sistema doble indirecto abierto si se sitúan con, al menos, el sector de alta presión en una sala de máquinas específica o al aire libre, sin conexión directa con recintos de categoría A o B y con una salida al aire libre. En cualquier otro caso, la carga será la indicada anteriormente para sistemas directos e indirectos abiertos.

En locales de categoría C (oficinas, laboratorios, despachos...) los sistemas directos o indirectos abiertos (ventilados o no) que se instalen en un lugar ocupado por personas deberán ser sellados y con una carga de refrigerante limitada a 10 kg mientras que los que se instalen con, al menos, el sector de alta presión en una sala de máquinas específica o al aire libre no tendrán que ser sellados y la carga estará limitada a 25 kg, excepto los que se instalen con todas sus partes en una sala de máquinas específica o al aire libre sin comunicación directa con espacios ocupados por personas, que no tendrán limitación de carga. Los sistemas indirectos cerrados y los dobles indirectos abiertos situados con, al menos, el sector de alta presión en una sala de máquinas específica o al aire libre, no tendrán límite de carga si la sala de máquinas no tiene contacto directo con espacios ocupados por persona. De no ser así, la carga estará limitada a 25 kg.

En locales de categoría D (industrias, almacenes frigoríficos, zonas de acceso restringido...) si el sistema se instala en un lugar ocupado por personas la carga podrá ser de hasta 50 kg siempre que la ocupación sea menor de 1 persona por cada 10 m<sup>2</sup> y haya suficientes salidas de emergencias, en cualquier otro caso se limitará a 10 kg. Los sistemas directos o indirectos abiertos ubicados completamente en una sala de máquinas específica o al aire libre no tendrán limitación de carga, si solo tienen instalado el sector de alta en una sala de máquinas específica o al aire libre tampoco tendrán limitada la carga si la densidad de ocupación del local en el que se ubique el sector de baja es inferior a 10 m<sup>2</sup> por persona. Los otros sistemas indirectos no tendrán restricción de carga.

- REFRIGERANTE GRUPO L3

Los refrigerantes de este grupo están prohibidos para su uso en acondicionamiento de aire o calefacción de bienestar en sistemas directos (p.ej. un Split), en sistemas indirectos abiertos (ventilados o no) (p.ej. un rooftop) y tampoco en el resto de sistemas indirectos (instalaciones con climatizadora o fan coils) para locales de categoría A o B, excepto en sistemas de refrigeración compactos (p.ej. un aparato de aire acondicionado portátil) si la carga es inferior a 0.2 kg (artículo 2.3.c), ya que a esos sistemas no aplica el reglamento, o en sistemas de refrigeración no compactos con carga inferior a 0.2 kg (artículo 2.2.b), en cuyo caso solo aplicará el artículo 21 relativo a la gestión de la documentación durante la puesta en marcha.

En locales de categoría A, los sistemas deberán ser siempre sellados. La carga está limitada al 50% del producto del límite práctico por el volumen del local más pequeño ocupado por personas sin sobrepasar 1.5 kg en sistemas instalados en un espacio ocupado por personas o solo con su sector de alta en una sala de máquinas específicas o al aire libre o, en el caso de sistemas instalados completamente en una sala de máquinas específica o al aire libre, 1 kg si se ubican en sótanos o 5 kg si lo hacen por encima del nivel del terreno. En el caso de que existan fuentes de ignición asociadas con el sistema será obligatorio el emplazamiento completo en una sala de máquinas específica o al aire libre.

En locales de categoría B se aplican los mismos requisitos que en los de categoría A, pero sin la reducción del 50% de la carga límite.

En locales de categoría C, cuando el sistema esté ubicado en un espacio ocupado por personas o con sólo el sector de alta en una sala de máquinas específica o al aire libre, la carga estará limitada al producto del límite práctico por el volumen más pequeño ocupado por personas sin sobrepasar 2.5 kg en instalaciones sobre el nivel del terreno o 1 kg en instalaciones bajo el nivel del terreno. Cuando todo el sistema se sitúe en una sala de máquinas específica o al aire libre, la carga estará limitada a 10 kg en instalaciones sobre el nivel del terreno y a 1 kg en instalaciones bajo el nivel del terreno.

En locales de categoría D, cuando la instalación se ubique por encima del nivel del terreno no habrá limitación de carga si el sistema se coloca en una sala de máquinas específica o al aire libre, o se limitará a 25 kg si solo el sector de alta está en una sala de máquinas específica o al aire libre, o a 10 kg si el sistema se coloca en un espacio ocupado por personas. Cuando la instalación se ubique por debajo del nivel del terreno la carga siempre estará limitada a 1 kg.

#### **4.1.3. Posibilidades de los refrigerantes alternativos**

Los refrigerantes usados hoy en día permanecen todos ellos al grupo de seguridad L1. En cambio, los considerados como alternativas tienen peores características de inflamabilidad o toxicidad. De este modo, tanto el R-32 como los HFO, R-1234yf y R-1234ze(E) pertenecen al grupo L2. Por su parte, los hidrocarburos R-600a y R-290 debido a su inflamabilidad se encuentran en el grupo L3 mientras que el amoníaco está en el grupo L2. Tan solo el CO<sub>2</sub> (R-744) pertenece al grupo L1 por ser no tóxico ni inflamable, aunque en la práctica concentraciones mayores del 10% provocan la pérdida de conciencia y la muerte.

El análisis hecho en el apartado 4.1.2 nos va a permitir comparar la carga máxima permitida para los distintos refrigerantes en las aplicaciones de estudio propuestas. Se recuerdan que estas son equipos compactos de refrigeración doméstica como frigoríficos y congeladores, o para climatización en viviendas como los aires acondicionado portátiles, equipos partidos de aire acondicionado para viviendas (Split), equipos compactos de aire acondicionado para pequeños comercios (compactos horizontales), sistemas rooftop para supermercados, sistemas autónomos de climatización VRV que necesitan grandes cargas de refrigerante y, por último, equipos compactos de gran tamaño como son las enfriadoras de agua utilizadas en climatización.

#### 4.1.3.1. Equipos compactos para refrigeración doméstica

Los sistemas de refrigeración doméstica son sistemas directos para viviendas (locales de categoría B) o a lo sumo locales de categoría A como residencias de ancianos u hospitales, instalados en su totalidad en un espacio ocupado por personas. Desde 2015 solo pueden contener refrigerantes con PCA inferior a 150, lo que excluye tanto al R-134a como al R-410A y al R-32.

Para refrigerantes L1 la carga máxima es el producto del límite práctico por el volumen del local. Para refrigerantes L2 o L3 la carga máxima se calcula igual, pero los equipos deben ser sellados herméticamente y está limitada a 2.5 kg los primeros y 1.5 kg los segundos. En el caso de locales de categoría A, la carga máxima de estos sistemas con refrigerantes L2 o L3 es el 50% de dicho producto.

Como en todos los casos la carga es proporcional al volumen, se pueden comparar los distintos refrigerantes atendiendo únicamente a su límite práctico, mostrados en la Tabla 6. Nótese que los límites prácticos de los refrigerantes L2 o L3 son muy inferiores a los del grupo L1. En la Figura 14 se muestra el porcentaje de carga máxima admisible usando refrigerantes alternativos en sistemas de refrigeración doméstica, comparados con la carga del R-134a.

Tabla 6. Límites prácticos de los principales refrigerantes

Refrigerante	Límite práctico (kg/m <sup>3</sup> )	Grupo de seguridad
R-134a	0.25	L1
R-410A	0.44	L1
R-32	0.054	L2
R-1234yf	0.058	L2
R-1234ze	0.061	L2
R-717	0.00035	L2
R-744	0.07	L1
R-600a	0.011	L3
R-290	0.008	L3

Para una cocina de 25 m<sup>3</sup>, podría emplearse hasta 6.25 kg de R-134a lo que contrasta con los 1.35 kg para R-32, 1.45 kg de R-1234yf o los 1.525 kg de R-1234ze(E). Para R-600a y R-290 la situación es aún más dramática, permitiéndose solo 275 g y 200 g respectivamente. Para el amoníaco la carga así calculada es prohibitiva (8.75 g) pero realmente se permitirían cargas inferiores a 500 g por ser este el mínimo marcado para refrigerantes L2 en el artículo 2. En el caso del CO<sub>2</sub>, que es un refrigerante del grupo A1, la carga máxima resulta 1.75 kg.

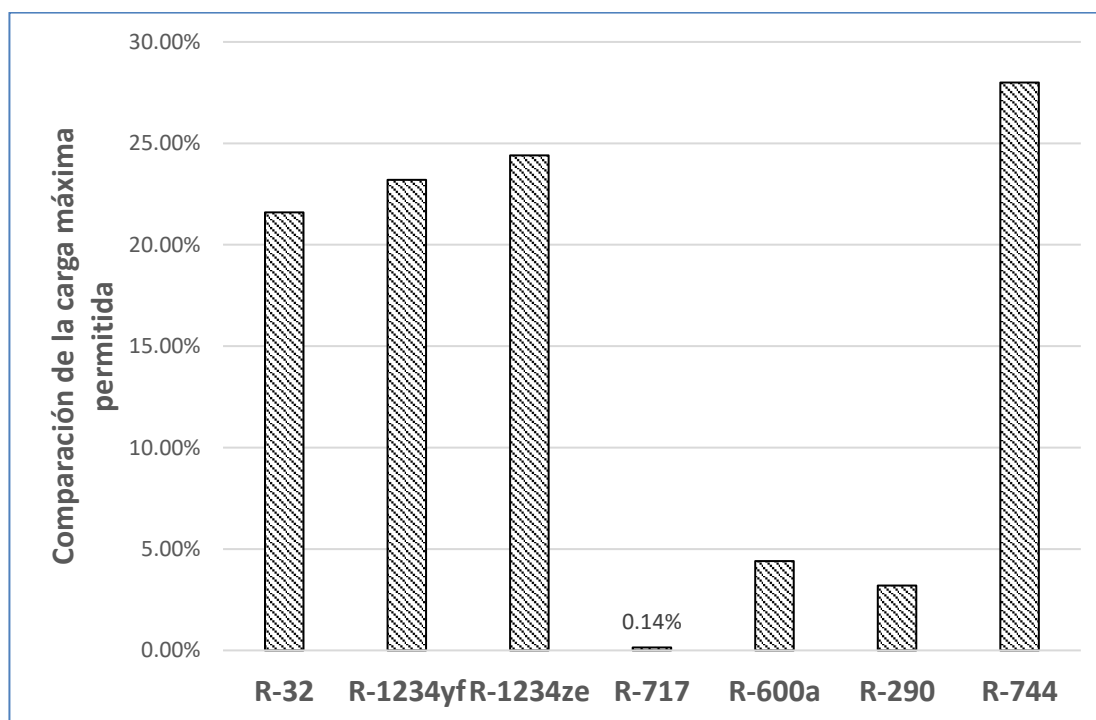


Figura 14. Comparación de la carga máxima para distintos refrigerantes en sistemas de refrigeración doméstica con respecto al R-134a

#### 4.1.3.2. Equipos compactos de aire acondicionado doméstico y para pequeños comercios

Los equipos de aire acondicionado portátiles son aparatos compactos herméticamente sellados que el usuario puede transportar de una habitación a otra. Son sistemas directos que durante su funcionamiento se encuentran completamente dentro del espacio ocupado. Se comercializan para ser usados en viviendas (locales de categoría B). A partir de 2020 no podrán contener refrigerantes con PCA mayor de 150 por lo que, al igual que en los frigoríficos o congeladores domésticos, los únicos refrigerantes de los hoy en día conocidos que pueden utilizarse son los HFO, los hidrocarburos y los refrigerantes naturales como el CO<sub>2</sub> o el amoníaco.

Los refrigerantes del grupo 2 solo pueden usarse con carga inferiores a 500 g y los del grupo 3 con cargas inferiores a 200 g por tratarse de una aplicación de confort humano. Los refrigerantes del grupo 1 tienen limitada su carga al producto del límite práctico por el volumen del local. Suponiendo un volumen del local de 40 m<sup>3</sup> resulta una carga de 10 kg para R-134a y 17.6 kg para R-410A. Para el CO<sub>2</sub>, la carga máxima es 2.8 kg.

Por su parte, los equipos compactos horizontales son aparatos fijos de aire acondicionado que se instalan con todas sus partes en el interior del espacio ocupado. Pueden verse instaladas en algunos pequeños comercios (locales de categoría B). No hay prevista en el Reglamento 517/2014 ninguna restricción directa para estos equipos, aunque los HFC usados en ellos verán reducida su comercialización progresivamente hasta 2030, lo que además se ha visto acarrear una subida de precios.

Se observa que este caso es idéntico al anterior en cuanto a la determinación de la carga máxima permitida. Los refrigerantes de los grupos L2 y L3 tienen prácticamente imposible su uso, al estar limitadas sus cargas a 500 g y 200 g respectivamente. Para locales de 240 m<sup>3</sup> se permite una carga de hasta 60 kg de R-134a y 105.6 kg de R-410A, mientras que para el R-744 se permiten 16.8 kg.

#### 4.1.3.3. Equipos compactos rooftop para supermercados

Los sistemas de climatización con rooftop son sistemas indirectos abiertos en emplazamientos de tipo 3. No van a experimentar restricciones directas en función del PCA de sus refrigerantes. Se utilizan en supermercados (locales de categoría B).

Por ser una aplicación de confort humano no pueden emplearse refrigerantes de los grupos L2 ni L3, que estarán limitados a los límites del artículo 2. Los refrigerantes del grupo L1 no tienen limitación.

#### **4.1.3.4. Equipos partidos de aire acondicionado y bombas de calor tipo Split**

Los equipos de aire acondicionado y bombas de calor tipo Split son sistemas directos para viviendas generalmente (locales de categoría B) instalados en emplazamientos de tipo 2 considerando la nueva definición, que solo exige que el compresor y el acumulador estén en la unidad exterior. De esta manera, no importa que al tratarse de bombas de calor reversible el cuerpo de alta pase a estar dentro del local ocupado cuando funciona en modo calefacción. Se recuerda que a partir de 2025 estará prohibido usar HFC con PCA mayor de 750 si la carga es inferior a 3 kg, lo que supondrá el fin del R-410A en estos equipos.

De cualquier manera, los refrigerantes del grupo L2 y L3 solo están permitidos para estos sistemas si su carga es inferior a 0.5 kg y 0.2 kg respectivamente. En cambio, para los refrigerantes L1 como el R-134a o R-410A la carga máxima será el producto del límite práctico por el volumen del local. Considerando un volumen de 50 m<sup>3</sup>, a partir de los límites prácticos de la Tabla 6, se calcula una carga máxima de 12.5 kg para R-134a y 22 kg para R-410A. El CO<sub>2</sub> puede usarse en esta aplicación con cargas de hasta 3.5 kg.

#### **4.1.3.5. Sistemas VRV**

Los sistemas VRV (volumen de refrigerante variable) son sistemas autónomos de climatización formado por n unidades interiores y una única unidad exterior. Los compresores y los acumuladores se encuentran en la unidad exterior por lo que pueden considerarse sistemas de emplazamiento tipo 2. Se pueden usar para dar confort a locales de distintas categorías como guarderías o residencias de ancianos (A), bloque de viviendas o cines (B), oficinas (C), entre otros. Al igual que en casos anteriores, los refrigerantes de los grupos L2 y L3 no están permitidos a no ser que sus cargas sean inferiores a 200 g y 500 g respectivamente, lo cual hace imposible su uso teniendo en cuenta que estas son instalaciones con mucho volumen de tuberías y por tanto necesitan mucha carga de refrigerante. Los refrigerantes L1, entre los que se incluye el CO<sub>2</sub>, no tienen limitación para locales de categoría C y D, mientras que su carga está limitada al producto del límite práctico por el volumen del local para los locales de acceso A y B.

#### **4.1.3.6. Enfriadoras de agua**

Las enfriadoras de agua son sistemas compactos de tipo indirecto cerrado que pueden emplearse en locales de cualquier categoría y generalmente se encuentran en un emplazamiento de tipo 3, con todas sus partes en una sala de máquinas específica o al aire libre. Se observa que para estas aplicaciones los refrigerantes del grupo L1 no tienen limitación. Tampoco para los del grupo L2 si están instaladas al aire libre o en salas de máquinas sin conexión con recintos de categoría A o B. Para el grupo L3 ocurre que si la enfriadora forma parte de una instalación de climatización de locales de categoría A y B entonces la carga está limitada a los 200 g del artículo 2. En cualquier otro caso, la carga máxima se calcularía como un 50% del producto del límite práctico por el volumen del local más pequeño ocupado por personas con cota superior en 5 kg para locales de categoría A y de igual manera para locales de categoría B pero sin la disminución del 50%. Si el local fuese de categoría C la carga está limitada a 10 kg y para locales de categoría D no habría restricciones.

## **4.2. Proyecto de nuevo Reglamento**

El pasado mes de abril de 2018 se hizo público el proyecto de nuevo Reglamento de Seguridad para Instalaciones Frigoríficas.

Como se ha querido justificar, existe una controversia entre el actual RSIF y el Reglamento europeo 517/2014. Mientras que este último, que al ser un Reglamento europeo es de aplicación directa en España sin que se tenga que promulgar normas nacionales, insta al abandono de los HFC en favor de las tecnologías alternativas, el RSIF dificulta en gran manera las instalaciones con refrigerantes distintos a aquellos del grupo L1, que agotan la capa de ozono o provocan el calentamiento atmosférico.

El real decreto 138/2011 estaba basado en la norma EN 378:2008, de la que ya existe una nueva versión de 2016 que incluye importantes modificaciones de cara a permitir que algunos refrigerantes alternativos entren en el mercado. La esencia de esta nueva normativa es la introducción de una nueva clasificación por inflamabilidad:

1. Refrigerantes que no muestran propagación de llama cuando se ensayan a +60°C y 101,3 kPa y, por ende, se consideran no inflamables.
2. Refrigerantes que cumplen que sí muestran propagación cuando se ensayan a +60°C y 101,3 KPa, que tienen un límite inferior de inflamabilidad cuando forman una mezcla con el aire igual o superior al 3.5% en volumen y que su calor de combustión es menor que 19 000 kJ/kg.
- 2L. Cumplen las tres características anteriores, pero además su velocidad de propagación de llama es inferior a 10 cm/s.
3. Refrigerantes que muestran propagación cuando se ensayan a +60°C y 101,3 KPa, que tienen un límite inferior de inflamabilidad cuando forman una mezcla con el aire inferior al 3.5% en volumen y que su calor de combustión es mayor o igual que 19 000 kJ/kg.

De este modo, el grupo 2L estaría situado entre el 1 y el 2, existiendo 8 clases de seguridad en lugar de 6 (Tabla 7). Finalmente, los refrigerantes se agrupan igualmente en los grupos de seguridad 1, 2 y 3, incluyendo el grupo 2 a las nuevas clases A2L y B2L.

Al igual que ocurre con el RSIF actual, el artículo 2 establece unos mínimos de carga, por debajo de los cuales los sistemas están exentos de las limitaciones del Reglamento. Se mantiene en 2.5 kg para refrigerantes L1 y 0.5 kg para los del grupo L2, a excepción de los refrigerantes de la clase A2L cuyo límite es  $6 \cdot LII$  [kg/m<sup>3</sup>]. Para los refrigerantes del grupo L3, al que pertenecen los hidrocarburos, se baja el límite de 0.2 kg a 0.15 kg.

Los límites inferiores de inflamabilidad de los tres principales refrigerantes de la clase A2L, que son R-32, R-1234yf y E-1234ze(E), se encuentra en torno a 0.3 kg/m<sup>3</sup> por lo que se puede estimar que mínimo impuesto por este artículo 2 para estas sustancias está en torno a 1.8 kg.

Tal y como ocurría con el RSIF de 2011, aunque el sistema esté exento de cumplir el Reglamento no ocurre lo mismo con la instalación. Si bien las definiciones de instalaciones de Nivel 1 y Nivel 2 son las mismas con respecto al RSIF de 2011, los requisitos a las instalaciones con refrigerantes A2L son mucho menores que a las de Nivel 2. Para ello, la única condición que deben cumplir es que la potencia de cada compresor no sea superior a 30 kW o que la suma total de potencia instalada supere los 100 kW, y que no se enfríe una cámara de atmósfera artificial. Estas instalaciones pueden ser llevadas a cabo por empresas de Nivel 1 en lugar de empresas de exclusivamente por empresas de Nivel 2. Los titulares no tienen la obligación de contratar ningún seguro de responsabilidad civil. La ejecución no requerirá de la redacción de un proyecto ni de la supervisión de un director de obra, sino tan solo de una memoria técnica descriptiva como corresponde a las instalaciones de Nivel 1.

#### 4.2.1. Nuevo procedimiento para el cálculo de la carga máxima

Este Reglamento remodela completamente la instrucción técnica IF-04 explicada anteriormente. En el apéndice 2 de la nueva IF-04 se detalla el procedimiento a seguir para determinar la carga máxima de los sistemas:

- a) Caracterizar el local y el emplazamiento del sistema.
- b) Determinar la categoría de toxicidad del refrigerante y su límite de toxicidad como el máximo entre el valor ATEL/ODL y el límite práctico.
- c) Calcular la carga máxima permitida por toxicidad como la mayor de la obtenida en la tabla A del apéndice 1 de esta IF-04 y, para sistemas herméticamente sellados, el producto de 20 m<sup>3</sup> por el límite de toxicidad o 150 gramos.
- d) Determinar la categoría de inflamabilidad del refrigerante y su límite inferior de inflamabilidad (LII).
- e) Calcular la carga máxima permitida por inflamabilidad como la mayor de la obtenida en la tabla B del apéndice 1 de esta IF-04 y, para sistemas herméticamente sellados, el producto del factor  $m_1$  por 1.5 para refrigerantes con inflamabilidad 2L,  $m_1$  para refrigerantes de inflamabilidad 2 y 3, o 150 gramos.

- f) La carga máxima permitida será la mínima de las calculadas por toxicidad (c) e inflamabilidad (e), sabiendo que si el refrigerante es de inflamabilidad 1 solo se calcula la carga máxima por toxicidad.

Tabla 7. Clases de seguridad nuevo RSIF

		Baja toxicidad	Alta toxicidad
Incremento riesgo - inflamabilidad	Sin propagación de llama	A1	B1
	Baja inflamabilidad	A2L	B2L
	Media inflamabilidad	A2	B2
	Alta inflamabilidad	A3	B3
		→ → Incremento riesgo - toxicidad	

Para el apartado a) hay que señalar que han cambiado tanto la clasificación de los locales como la de los sistemas por su tipo de emplazamiento. En este nuevo RSIF, según lo dispuesto en la norma EN 378:2016, los locales se clasifican en acceso general (A), acceso supervisado (B) y acceso restringido (C), donde el tipo de acceso general (A) aúna a las categorías A y B del RSIF de 2011 y las categorías C y D cambian la letra por B y C, respectivamente. En cuanto a los tipos de emplazamiento se mantienen los tipos 1, 2 y 3 con las mismas definiciones, pero se añade el tipo 4 para aquellos en los que “todas las partes que contienen refrigerante se encuentran en una envolvente ventilada”. Según esta misma norma, una envolvente ventilada es un espacio que contiene al sistema de refrigeración y que no permite que el aire circule de la envolvente al exterior, existiendo para ello un sistema de ventilación que descarga a un conducto de ventilación.

En el cálculo de la carga máxima por inflamabilidad, la tabla A del apéndice 1 de la IF-04 tiene varias cotas superiores que son:

- $m_1 = 4 \text{ m}^3 \cdot \text{LII}$
- $m_2 = 26 \text{ m}^3 \cdot \text{LII}$
- $m_3 = 130 \text{ m}^3 \cdot \text{LII}$

En el caso de refrigerantes del grupo 2L las cotas se multiplican por 1.5.

Para entrar en las tablas A y B del apéndice 1 se necesita respectivamente la categoría de toxicidad o inflamabilidad del refrigerante, la categoría del local y el tipo de sistema por su emplazamiento. Estas tablas pueden explicarse como se hizo para la tabla de la IF-04 del RSIF de 2011.

- Tabla A – Requisitos de límite de carga para refrigerantes basados en su toxicidad

No hay restricción en la carga para emplazamientos de tipo 3 sea cual sea la categoría del local.

Para emplazamientos de tipo 2, siempre que el local no sea de acceso general (A), los refrigerantes con grupo de toxicidad A no tendrán límite. Los refrigerantes de toxicidad B no tendrán límite si la densidad de ocupación es inferior a 1 persona por  $10 \text{ m}^2$ , excepto si son plantas superiores sin salidas de emergencia o sótanos de locales de acceso supervisado (B). En cualquier otro caso, los sistemas en emplazamientos de tipo 2 están restringidos a 25 kg.

Para emplazamientos de tipo 1, siempre que el local no sea de acceso general (A), los refrigerantes con toxicidad A no tendrán límites excepto en plantas superiores sin salidas de emergencias o sótanos, donde estarán limitados al producto del volumen del local por el límite de toxicidad. Los refrigerantes con toxicidad B tienen su carga limitada a 10 kg excepto para plantas superiores sin salidas de emergencias o sótanos de locales de acceso supervisado (B) que se calculará como el producto del volumen del local por el límite de toxicidad y para locales de acceso restringido (C) con salidas de emergencia y densidad de ocupación inferior a 1 persona por 10 m<sup>2</sup>, en cuyo caso el límite aumenta a 50 kg.

Para emplazamientos de tipo 1 o 2 en locales de acceso general (A) la carga máxima se calculará como el producto del volumen del local por el límite de toxicidad sea cual sea el grupo de toxicidad del refrigerante.

- Tabla B – Requisitos de límite de carga para sistemas de refrigeración basados en la inflamabilidad

No hay restricción en la carga para emplazamientos de tipo 4 sea cual sea la categoría del local. Tampoco hay restricción para emplazamientos de tipo 3 que usen refrigerantes con grupo de inflamabilidad 2L y 2. Para refrigerantes de inflamabilidad 3 en este tipo de emplazamiento la carga está limitada a 5 kg en locales de acceso general (A) y a 10 kg en locales de acceso supervisado (B), mientras que no hay limitación en locales de acceso restringido (C).

Para aplicaciones de climatización con emplazamientos de tipo 1 o 2 la carga máxima se calcula según el método desarrollado en el apéndice 3, con una cota superior igual a  $m_2$  o a al mínimo entre  $m_2$  y 1.5 kg si el refrigerante es de inflamabilidad 3.

Para el resto de aplicaciones con emplazamientos de tipo 1 o 2 la carga máxima se calcula como el 20% del producto del LII por el volumen del local con una cota superior indicada en la Tabla 8, excepto en sistemas con tipo de emplazamiento 2 en locales de categoría C que usen refrigerantes de inflamabilidad 2L y la densidad de ocupación sea inferior a 1 persona por cada 10 m<sup>2</sup>, que no tendrán restricción.

Tabla 8. Cota superior de la carga máxima por inflamabilidad en emplazamientos de tipo 1 o 2 para aplicaciones distintas del confort humano

Inflamabilidad	Local	Emplazamiento	Otros	Límite
2L	A	1 o 2	$m_2$	
	B	1	$m_2$	
		2	25 kg	
	C	1	<1 persona/ 10m <sup>2</sup>	50 kg
		1	otros	$m_2$
		2	25 kg	
2	A o B	1 o 2	$m_2$	
	C	1 o 2	sótanos	$m_2$
		1	plantas superiores	10 kg
		2	plantas superiores	25 kg
3	A, B o C	1 o 2	sótanos	1 kg
	A	1 o 2	nivel terreno	1.5 kg
	B	1 o 2	nivel terreno	1.5 kg
	C	1	nivel terreno	10 kg
		2	nivel terreno	25 kg

Para los refrigerantes de las clases A1 o A2L en emplazamientos de tipo 2 la carga máxima puede calcularse, tanto para toxicidad como para inflamabilidad, mediante el procedimiento alternativo del apéndice 4 si además se cumplen las condiciones que ahí se detallan, estando limitada en cualquier caso a 150 kg para refrigerantes de inflamabilidad 1 o a  $m_3 \cdot 1.5$  (en torno a 58.5 kg) para refrigerantes del grupo 2L.



De esta manera, siguiendo este procedimiento podemos llegar hasta a tres tipos de resultados: uno calculado directamente como un porcentaje del producto del volumen del local por el límite de toxicidad o el límite inferior de inflamabilidad, uno obtenido según el apéndice 3 y otro según el apéndice 4, ambos de la propia IF-04.

El apéndice 3 se aplica para calcular la carga máxima permitida por inflamabilidad en sistemas de aire acondicionado y bombas de calor para climatización. La carga máxima de refrigerante se calcula con la ecuación 4-1.

$$m_{m\acute{a}x} = 2.5 \cdot LII^{\frac{5}{4}} \cdot h_o \cdot A^{0.5} \quad (4-1)$$

Donde  $h_o$  es la altura a la que está instalada el aparato: 0.6 m para emplazamientos de suelo, 1.8 m para montaje en pared, 1 m para equipos de ventana o 2.2 m para equipos de techo. A es el área del recinto en  $m^2$ .

Cuando la ecuación 4-1 resulte inferior a  $m_1$  para refrigerantes de inflamabilidad 2 o 3, o  $m_1 \cdot 1.5$  para refrigerantes de inflamabilidad 2L, la carga máxima será  $m_1$  o  $m_1 \cdot 1.5$ , según corresponda.

De forma análoga, cuando la carga supere  $m_1$  en sistemas con refrigerante de inflamabilidad 2 o 3, pero que no se conozca el recinto en el que se va a instalar, puede determinarse la superficie mínima requerida para que el equipo de carga  $m$  (kg) pueda instalarse despejando de 4-1.

$$A_{m\acute{i}n} = \frac{m^2}{2.5 \cdot LII^{\frac{5}{4}} \cdot h_o} \quad (4-2)$$

Para el caso particular de unidades de aire acondicionado o bombas de calor portátiles cuya carga se encuentre entre los límites de la ecuación 4-3, la carga máxima debe cumplir con la ecuación 4-4 o la superficie mínima requerida para ser instalado satisfacer la ecuación 4-5.

$$4m^3 \cdot LII \leq m \leq 8m^3 \cdot LII \quad (4-3)$$

$$m_{m\acute{a}x} = 0.25 \cdot A \cdot LII \cdot 2.2 \quad (4-4)$$

$$A_{m\acute{i}n} = \frac{m}{0.25 \cdot LII \cdot 2.2} \quad (4-5)$$

El apéndice 4 es válido para sistemas de emplazamiento tipo 2 que utilicen refrigerantes de las clases de seguridad A1 o A2L y cuya carga sea inferior a 150 kg y  $1.5 \cdot m_3$  para refrigerantes A2L, entre otras condiciones enumeradas en dicho apéndice 4 relativos al diseño del equipo. Este apéndice permite calcular la carga máxima de refrigerante a partir del volumen del local y de los límites RCL, QLMV o QLAV propios de cada refrigerante, se distingue si la ocupación es sótano o no:

- Para ocupaciones excepto en la planta sótano del edificio:

$$\begin{cases} m_{m\acute{a}x} = QLMV \cdot V_{local}[m^3] \\ m_{m\acute{a}x} = QLAV \cdot V_{local}[m^3] \text{ si se toma, al menos, una medida adicional} \\ m_{m\acute{a}x} = 150 \text{ kg o } 1.5 \cdot m_3, \text{ al menos, dos medidas adicionales} \end{cases}$$

- Para ocupaciones en la planta sótano del edificio:

$$\begin{cases} m_{m\acute{a}x} = RCL \cdot V_{local}[m^3] \\ m_{m\acute{a}x} = QLMV \cdot V_{local}[m^3] \text{ si se toma, al menos, una medida adicional} \\ m_{m\acute{a}x} = QLMA \cdot V_{local}[m^3] \text{ si se toman, al menos, dos medidas adicionales} \end{cases}$$

Las medidas adicionales pueden ser la ventilación (natural o mecánica), válvulas de cierre por seguridad que aislen el espacio ocupado del resto del circuito frigorífico asegurando que la cantidad de refrigerante fugado es inferior al QLMV (o RCL para pisos subterráneos) y alarma de seguridad, junto con un dispositivo de detección de gas, que avise de una fuga de refrigerante. Se explican con más detalle en los apartados 3 y 4 del apéndice 4 de la IF-04.

## 4.2.2. Comparación de las cargas máximas de ambos Reglamentos

Las cargas máximas permisibles para los refrigerantes alternativos en los casos concretos que se estudiaron resultaron ser casi en la totalidad de los casos insuficientes. El objetivo de este apartado es comprobar si el nuevo RSIF es realmente más permisivo o bajo qué circunstancias.

### 4.2.2.1. Equipos compactos para refrigeración doméstica

Los sistemas de refrigeración doméstica como frigoríficos y congeladores son sistemas directos para locales de acceso general (A) según la nueva normativa, instalados en su totalidad en el espacio ocupado (emplazamiento tipo 1). Se supondrá un volumen de 25 m<sup>3</sup>.

Para los refrigerantes del grupo A2L, que son el R-32, el R-1234yf y el R-1234ze(E) la aplicación del procedimiento de determinación de la carga máxima resulta en el máximo entre  $m_1$  (multiplicado por 1.5 al ser refrigerantes del grupo A2L) y el 20% del producto entre el LII y el volumen del local, siendo en todos los casos mayor  $m_1$ . De hecho, el segundo cálculo resulta en cargas similares a las del RSIF de 2011. De esta manera, la carga máxima resulta 1.842 kg para R-32, 1.692 kg para R-1234yf y 1.818 kg R-1234ze(E).

Para los hidrocarburos la carga máxima es de nuevo el máximo entre  $m_1$  y el 20% del producto entre el LII y el volumen del local, siendo más favorable el segundo cálculo en este caso. Las cargas resultan 215 g para R-600a y 190 g para R-290.

Para el amoníaco la carga máxima se calcula como el producto del límite de toxicidad por el volumen del local, lo que resulta 8.75 g, así que el límite es el marcado por el artículo 2 para refrigerantes L2 que sigue siendo de 500 g.

Para el CO<sub>2</sub> (R-744) la carga máxima se calcula igual que para el amoníaco, resultando 2.5 kg.

Tabla 9. Comparación de la carga máxima permitida para los aparatos compactos de refrigeración doméstica entre el RSIF de 2011 y el nuevo proyecto de RSIF para 2018

Refrigerante	RSIF 2011	RSIF 2018
R-32	1.35 kg	1.842 kg
R-1234yf	1.45 kg	1.692 kg
R-1234ze(E)	1.525 kg	1.818 kg
R-717	500 g	500 g
R-744	1.75 kg	2.5 kg
R-600a	275 g	215 g
R-290	200 g	190 g

En la Tabla 9 se muestran los resultados obtenidos por los métodos del RSIF 2011 y del RSIF 2018. Se observa un aumento de la carga máxima para los refrigerantes de clase A1 y A2L mientras que para el amoníaco o los hidrocarburos la situación se mantiene igual o incluso empeora. En la práctica, el R-32 no puede emplearse para estas aplicaciones porque, al igual que el R-134a, su PCA es superior a 150. Por tanto, para los aparatos compactos de refrigeración doméstica las dos opciones más interesantes con los HFO R-1234yf y el R-1234ze(E).

### 4.2.2.2. Equipos compactos de aire acondicionado doméstico y para pequeños comercios

Los equipos de aire acondicionado portátiles son sistemas directos compactos, sellados herméticamente, instalados en locales de acceso general (A) y en emplazamientos de tipo 1 para actividades de confort humano. Se supone un volumen de 40 m<sup>3</sup> y una altura de 2.5 m, lo que resulta en un local de 16 m<sup>2</sup>.

Para los refrigerantes del grupo A2L, es decir, para R-32, R-1234yf y R-1234ze(E)) la carga máxima se calcula mediante la ecuación 4-4 siguiendo el procedimiento del apéndice 3, resultando 2.7 kg, 2.48 kg y 2.67 kg respectivamente.

Para los hidrocarburos la carga máxima también se calcula mediante la ecuación 4-4, resultando en 378 g para

el R-600a y en 334 g para el R-290.

La carga máxima para el amoníaco se calcula como el producto de su límite de toxicidad con el volumen del local, que resulta 14 g, por lo que se aplica otra vez el artículo 2 para permitir una carga de hasta 500 g. Igual se calcula para el dióxido de carbono, resultando 4 kg.

Tabla 10. Comparación de la carga máxima permitida para los aparatos portátiles de A/C entre el RSIF de 2011 y el nuevo proyecto de RSIF para 2018

Refrigerante	RSIF 2011	RSIF 2018
R-32	500 g	2.7 kg
R-1234yf	500 g	2.48 kg
R-1234ze(E)	500 g	2.67 kg
R-717	500 g	500 g
R-744	2.8 kg	4 kg
R-600a	200 g	378 g
R-290	200 g	334 g

A la vista de los resultados mostrados en la Tabla 10, las cargas de amoníaco, isopropano y propano siguen siendo insuficientes para poder llevar a cabo esta aplicación. En cambio, las cargas de los HFO han aumentado significativamente, concluyéndose que son la alternativa más favorable para los aparatos portátiles de A/C. El R-32 no es una solución práctica porque su PCA es superior a 150, estando prohibido para este uso a partir del 1 de enero de 2020. También se observa un aumento significativo en la carga máxima de CO<sub>2</sub>.

Los equipos compactos horizontales se instalan también en locales con la misma categoría de acceso y el mismo tipo de emplazamiento que los aparatos portátiles de aire acondicionado, pero en lugar de para viviendas están diseñados para locales de mayor tamaño. Se supondrá un local de 240 m<sup>3</sup> y 80 m<sup>2</sup>, donde se ha supuesto una altura de 3 m.

La carga máxima del R-32, el R-1234yf y el R-1234ze(E) se calcula mediante la ecuación 4-1, estando acotado superiormente al valor de m<sub>2</sub>. Se obtienen 5.11 kg para R-32, 4.6 kg para R-1234yf y 5.03 kg para R-1234ze(E).

Para el R-600a y el R-290 la carga se calcula también mediante la ecuación 4-1 pero limitado al mínimo entre m<sub>2</sub> y 1.5 kg. Resultando unas cargas máximas de 440 g para el primero y 375 g para el segundo.

Una vez más, la alta toxicidad del amoníaco limita su carga a 80 g que realmente son 500 g por el artículo 2. La carga de CO<sub>2</sub> resulta 24 kg.

Tabla 11. Comparación de la carga máxima permitida para los equipos compactos horizontales entre el RSIF de 2011 y el nuevo proyecto de RSIF para 2018

Refrigerante	RSIF 2011	RSIF 2018
R-32	500 g	5.11 kg
R-1234yf	500 g	4.6 kg
R-1234ze(E)	500 g	5.03 kg
R-717	500 g	500 g
R-744	16.8 kg	24 kg
R-600a	200 g	440 g
R-290	200 g	375 g

La Tabla 11 muestra como de nuevo los más beneficiados por el nuevo Reglamento son el R-32, las HFO y, en menor proporción, el R-744, mientras que el amoníaco y los hidrocarburos no podrían emplearse para estas aplicaciones.

#### 4.2.2.3. Equipos compactos rooftop para supermercados

Los sistemas de climatización con rooftop son sistemas indirectos abiertos en emplazamientos de tipo 3. No van a experimentar restricciones directas en función del PCA de sus refrigerantes. Se utilizan en supermercados (locales de categoría A).

En este nuevo Reglamento los refrigerantes de los grupos L1 y L2 no tienen límites. Tan solo los hidrocarburos R-600a y R-290, dado que son de clase A3, tienen limitada su carga a 5 kg.

#### 4.2.2.4. Equipos partidos de aire acondicionado y bombas de calor tipo Split

Se instalan en locales de acceso general (A) en emplazamientos de tipo 2 como se explicó anteriormente. Se supondrá un local de 50 m<sup>3</sup> y 2.5 m de altura.

Para el R-32, el R-1234yf y el R-1234ze(E) la carga máxima se calcula como el máximo entre el resultado de la ecuación 4-1 o el producto del QLMV por el volumen del local, es decir, aplicar el apéndice 4 pero sin medidas adicionales de seguridad. En todos los casos el valor más permisivo se obtiene aplicando el procedimiento del apéndice 3, es decir, la ecuación 4-1. Resultan 4.6 kg para R-32, 4.14 kg para R-1234yf y 4.52 kg para R-1234ze(E).

Para los hidrocarburos la carga máxima se calcula también usando la ecuación 4-1 limitado al mínimo entre m<sub>2</sub> y 1.5 kg. Para el R-600a la carga máxima es de 400 g y para el R-290, de 340 g.

La carga máxima de amoníaco se calcula por su límite de toxicidad, resultando 18 g, aunque podría elevarse hasta 500 g aunque al ser un equipo que sí requiere instalación habría que asumir las estrictas condiciones de una instalación de nivel 2 que ya no aplican a los refrigerantes de clase A2L. En cuanto al CO<sub>2</sub>, la carga es 5 kg.

Tabla 12. Comparación de la carga máxima permitida para los equipos partidos Split entre el RSIF de 2011 y el nuevo proyecto de RSIF para 2018

Refrigerante	RSIF 2011	RSIF 2018
R-32	500 g	4.6 kg
R-1234yf	500 g	4.14 kg
R-1234ze(E)	500 g	4.52 kg
R-717	500 g	500 g
R-744	3.5 kg	5 kg
R-600a	200 g	400 g
R-290	200 g	340 g

Se concluye (Tabla 12) que para los equipos partidos para la climatización en viviendas solo las cargas máximas para el R-32, el R-1234yf, el R-1234ze(E) y el R-744 permiten su uso para estos aparatos.

#### 4.2.2.5. Sistemas VRV

Los sistemas VRV son sistemas para la climatización en emplazamiento de tipo 2 que pueden usarse para locales tanto de acceso general (A), como de acceso supervisado (B) o de acceso restringido (C). En el RSIF de 2011, los refrigerantes de los grupos L2 y L3 tenían prohibido su uso en estos sistemas fuese cual fuese la categoría del local al ser el VRV un sistema directo.

Los sistemas VRV implican instalaciones de mayor envergadura que cualquiera de los comentados anteriormente. Se emplean para edificios de gran tamaño.

Para el R-32 y las HFO podemos calcular la carga máxima usando el apéndice 4. Si se diseñan con dos medidas adicionales, la carga máxima será m<sub>3</sub> que vale 60 kg para R-32, 55 kg para R-1234yf y 59 kg para R-1234ze(E).

La carga de los hidrocarburos no puede calcularse usando el apéndice 4 por ser refrigerantes de clase A3. Se debería aplicar la ecuación 4-1 pero podemos suponer que este cálculo superará la cota de m<sub>2</sub>. Resulta 1.12 kg para R-600a y 1 kg para R-290.

En el caso del amoníaco la carga máxima por inflamabilidad se calcula sea cual sea la categoría del local usando la ecuación 4-1 con una cota superior,  $m_2$ , de 4.5 kg. En cuanto a la carga máxima por toxicidad, para locales de acceso general se calcula como el producto de su límite de toxicidad por el volumen del local, lo cual se ha visto en los casos anteriores resulta en una carga muy pequeña que imposibilita el uso del amoníaco como refrigerantes en estos sistemas. En cambio, si los locales son de acceso tipo B o tipo C, la carga por toxicidad puede ser de 25 kg o no tener límite según las particulares del recinto. Por tanto, para locales de acceso B o C, la carga máxima es la calculada por inflamabilidad.

Los refrigerantes del grupo A1 como el dióxido de carbono también pueden calcular su carga para locales de acceso general mediante el método simplificado del apéndice 4, que sitúa la carga máxima en 150 kg si se toman, al menos, dos medidas adicionales. Para el resto de locales el R-744 no tiene limitación.

En la Tabla 13 se resumen las conclusiones del estudio de carga máxima para sistemas VRV. Sin duda, las cargas para R-600a y R-290 hacen imposible su uso. El R-32 y las HFO no tendrían ningún problema para estos sistemas, siendo las alternativas más atractivas para reemplazar a los HFC. El R-717 solo podría tener sentido en instalaciones pequeñas de VRV para locales de categoría B o C, aunque si la superficie del local cerrado más pequeño es inferior a 220 m<sup>2</sup> (calculados para 4.5 kg usando la ecuación 4-1), habría que calcular la carga máxima usando la ecuación 4-1.

Tabla 13. Comparación de la carga máxima permitida para los sistemas VRV entre el RSIF de 2011 y el nuevo proyecto de RSIF para 2018

Refrigerante	RSIF 2011	RSIF 2018
R-32	500 g	60 kg
R-1234yf	500 g	55 kg
R-1234ze(E)	500 g	59 kg
R-717	500 g	500 g (A)   4.5 kg (B o C)
R-744 <sup>(a)</sup>	0.07 · V kg (A)	150 kg (A)
R-600a	200 g	1.12 kg
R-290	200 g	1 kg

<sup>(a)</sup> Sin limitación para locales de categoría B o C

#### 4.2.2.6. Enfriadoras de agua

Las enfriadoras de agua se instalan en emplazamientos de tipo 3, formando parte de los sistemas de climatización de locales de cualquier categoría. En la Tabla 14 se observa que para los refrigerantes de los grupos L1 y L2 no hay limitación de carga, tal y como ocurría en el RSIF de 2011. Para los hidrocarburos la carga máxima tiene los mismos límites en el nuevo proyecto de RSIF que en el anterior, con excepción de en los locales de acceso general donde ahora el límite son 5 kg y antes estaban prohibidos.

Tabla 14. Comparación de la carga máxima permitida para las enfriadoras de agua entre el RSIF de 2011 y el nuevo proyecto de RSIF para 2018

Refrigerante	RSIF 2011	RSIF 2018
R-32	Sin límite	Sin límite
R-1234yf	Sin límite	Sin límite
R-1234ze(E)	Sin límite	Sin límite
R-717	Sin límite	Sin límite
R-744	Sin límite	Sin límite
R-600a	200 g (A)   10 kg (B)   Sin límite (C)	5 kg (A)   10 kg (B)   Sin límite (C)
R-290	200 g (A)   10 kg (B)   Sin límite (C)	5 kg (A)   10 kg (B)   Sin límite (C)

### 4.3. Tabla resumen

En la Tabla 15 se resumen las conclusiones de los estudios llevados a cabo en esta sección. Se representan para cada uno de los refrigerantes analizados sus cargas máximas permitidas en los diferentes casos estudios tanto para el RSIF 2011 como para el RSIF 2018. Se han añadido las cargas del R-134a y R-410A según el RSIF 2018, que en todos los casos coincide con la calculada para el RSIF 2011 excepto en las instalaciones de VRV donde antes no había límites y ahora están restringidas a 150 kg según el apéndice 4.

	Refrigeración doméstica (25 m3)		A/C compacto portátil (40 m3)		A/C compacto comercios (240 m3)		A/C split viviendas (50 m3)		Rooftop supermercados		VRV		Enfriadora edificios gran tamaño	
	RSIF 2011	RSIF 2018	RSIF 2011	RSIF 2018	RSIF 2011	RSIF 2018	RSIF 2011	RSIF 2018	RSIF 2011	RSIF 2018	RSIF 2011	RSIF 2018	RSIF 2011	RSIF 2018
R-134a	6.25	6.25	10	10	60	60	12.5	12.5	Sin límite	Sin límite	Sin límite	150	Sin límite	Sin límite
R-410A	11	11	17.6	17.6	105.6	105.6	22	22	Sin límite	Sin límite	Sin límite	150	Sin límite	Sin límite
R-32	1.35	1.842	0.5	2.7	0.5	5.11	0.5	4.6	Sin límite	Sin límite	0.5	60	Sin límite	Sin límite
R-1234yf	1.45	1.692	0.5	2.48	0.5	4.6	0.5	4.14	Sin límite	Sin límite	0.5	55	Sin límite	Sin límite
R-1234ze(E)	1.525	1.818	0.5	2.67	0.5	5.03	0.5	4.52	Sin límite	Sin límite	0.5	59	Sin límite	Sin límite
R-717	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	Sin límite	Sin límite	0.5	0.5(A)   4.5 (BoC)	Sin límite	Sin límite
R-744	1.75	2.5	2.8	4	16.8	24	3.5	5	Sin límite	Sin límite	Sin límite	150	Sin límite	Sin límite
R-600a	0.275	0.215	0.2	0.378	0.2	0.44	0.2	0.4	0.2	5	0.2	1.12	0.2	5
R-290	0.2	0.19	0.2	0.334	0.2	0.375	0.2	0.34	0.2	5	0.2	1	0.2	5

Tabla 15. Resumen de las cargas máximas permitidas en kg para los diferentes casos de estudios según el RSIF 2011 y el RSIF 2018





## 5 CONCLUSIONES

---

No existe el refrigerante perfecto, tan si quiera 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, también influyen sus características medioambientales y de seguridad: los refrigerantes tienen un Potencial de Agotamiento de la capa de Ozono y un Potencia de Calentamiento Atmosférico, también tienen un límite de toxicidad y otro de inflamabilidad. Paradójicamente, los refrigerantes menos contaminantes, suelen ser también los menos seguros. 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.

La protección del medio ambiente es 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.

Hace 30 años entró en vigor el Protocolo de Montreal que supuso el final de los CFC en todo el mundo mientras que el proceso de abandono de los HCFC sólo está casi completo en los países más desarrollados. Sin duda, el país más beneficiado ha sido China, considerado en la década de los 90 un país en vías de desarrollo, que actualmente emite HCFC a un ritmo mayor que Estados Unidos a principios de siglo y dejará de usar estos refrigerantes en 2030.

Los responsables del calentamiento atmosférico son los llamados gases de efecto invernadero, entre los que se encuentran el CO<sub>2</sub>, el CH<sub>4</sub>, el N<sub>2</sub>O, el H<sub>2</sub>O y los gases fluorados. Hay que matizar que los gases fluorados que provocan efecto invernadero no son solo los HFC, sino que también los CFC (ya prohibidos) y los HCFC, que se recuerda China seguirá emitiendo hasta 2030, tienen un potencial de calentamiento atmosférico que además es mucho mayor que el de los HFC. De cualquier manera, el informe del IPCC más reciente estima que las emisiones de gases fluorados solo representan un 2% del efecto invernadero antropogénico total. De hecho, en una instalación frigorífica dos tercios del impacto medioambiental en cuestión de calentamiento atmosférico se debe al efecto indirecto del consumo eléctrico y solo un tercio a las emisiones directa de refrigerante. Parece, por tanto, que la mejor manera de reducir el impacto de estas instalaciones es mejorando su eficiencia. También se deduce que los esfuerzos internacionales deberían ir dirigidos en fomentar las energías limpias, que no emiten CO<sub>2</sub>.

Aun así, la Comisión Europea decidió publicar en 2014 un nuevo Reglamento de gases fluorados de efecto invernadero, endurecido con respecto al anterior de 2006. Los HFC serán prohibidos en los próximos años para sus aplicaciones más comunes, como el R-134a para los frigoríficos y congeladores domésticos o la climatización de los vehículos, el R-410A para los equipos partidos de aire acondicionado y en equipos portátiles, o el R-404A en la refrigeración comercial, entre otros. El resto de HFC sufrirá directamente una reducción de las cantidades existentes en el mercado y, previsiblemente, un incremento de su precio indirectamente debido al sistema de cuotas y a la disminución de la oferta. Las medidas de contención, como los estrictos controles de fugas o los certificados obligatorios para los operadores, suponen una dificultad añadida al diseño y operación de las instalaciones, en favor de tecnologías alternativas.

Se puede afirmar que el actual Reglamento de Seguridad para Instalaciones Frigoríficas, aprobado mediante el real decreto 138/2011, impide la utilización de refrigerantes distintos a los del grupo de seguridad L1, en su mayoría HFC, para las aplicaciones de climatización en sistemas directos o indirectos abiertos a cualquier escala, pues los mínimos marcados por el artículo 2 a los sistemas de 500 g para refrigerantes L2 (R-32, R-1234yf, R-1234ze(E) o R-717) y 200 g para refrigerantes L3 (hidrocarburos) parecen insuficientes hasta para el sistema de climatización de la habitación de una vivienda. Además, si el equipo requiere instalación habría que cumplir con los estrictos requisitos de una instalación de Nivel 2 que, entre otros, obligan a que el titular de la instalación tenga contratado un seguro de responsabilidad civil que cubra los riesgos de la instalación de, al menos, 500 000€.

No habría problema para sistemas de climatización con enfriadoras de agua que usen refrigerantes del grupo L2 ni del grupo L3 si el edificio a climatizar puede clasificarse en los grupos C o D.

Asimismo, en el caso de los frigoríficos y congeladores domésticos las cargas máximas permitidas solo permitirían utilizar R-1234yf o R-1234ze(E), puesto que el R-32 está prohibido por ser su PCA mayor de 150.

Para resolver la disyuntiva entre el abandono de los HFC perseguido por el Reglamento F-Gas y las dificultades jurídicas del RSIF a los sistemas alternativos, se está elaborando un Reglamento de Seguridad para Instalaciones Frigoríficas. Del estudio aquí realizado se puede concluir que el nuevo RSIF está claramente orientado a que los refrigerantes de la nueva clase A2L sustituyan a los HFC en la gran parte de las aplicaciones. A la clase A2L pertenecen únicamente el R-32, el R-1234yf, el R-1234ze(E) y las mezclas de estos.

Los sistemas de climatización estudiados han sido sistemas compactos y partidos de climatización en viviendas, equipos compactos de climatización para pequeños comercios, sistemas rooftop para supermercados, sistemas VRV y enfriadoras de agua para climatización usando agua como fluido secundario. Se ha concluido que las cargas permitidas para los refrigerantes A2L son suficientes para poder llevarlos a cabo. En cambio, las cargas del R-717, el R-600a y el R-290 apenas han cambiado. Las cargas máximas del dióxido de carbono, que es un refrigerante L1, han aumentado ligeramente pues su límite de toxicidad ha pasado de  $0.072 \text{ kg/m}^3$  a  $0.1 \text{ kg/m}^3$ .

Solo se ha estudiado la refrigeración doméstica como aplicación distinta a la climatización. Se ha comprobado que las cargas máximas de los refrigerantes con clase A2L han aumentado ligeramente mientras que la de los hidrocarburos disminuyen. De hecho, el mínimo marcado para los hidrocarburos en el artículo 2 ha disminuido de 200 g a 150 g, lo que sin duda limitará su uso aún más en los frigoríficos y congeladores domésticos.

En mi opinión, estamos ante una gran oportunidad para dar paso a una generación de refrigerantes definitiva. Para ello debemos aprender de los errores del pasado, la siguiente generación debe pensar en el medio ambiente, pero no solo en cuanto a agotamiento de la capa de ozono o calentamiento atmosférico, sino adelantarnos a nuevos problemas que pudiesen surgir. No olvidemos que cuando se firmó el Protocolo de Montreal para eliminar a las sustancias cloradas que destruían la capa de ozono se apostó por los HFC ignorando los problemas de calentamiento atmosférico que ya se conocían desde principios de los 90. En este sentido, solo los refrigerantes naturales como el  $\text{CO}_2$ , el amoníaco o los hidrocarburos tienen garantías de ser sustancias sostenibles con el medio ambiente. Por el contrario, los nuevos HFO son fluidos artificiales de los que poco se conocen y algunos estudios incluso señalan que cuando se liberan en la atmósfera sus moléculas se disocian en ácido trifluoroacético, que podrían acumularse en algunos ecosistemas aumentando su acidez [Ciconkov, 2017].

El nuevo RSIF ha preferido apostar por estas sustancias y por el R-32 en lugar de por aumentar la seguridad y minimizar los riesgos de fuga de los equipos e instalaciones. A mi juicio, esta solución no será definitiva y seguramente acabemos viendo un nuevo Reglamento de Seguridad para Instalaciones Frigoríficas en un futuro en torno al año 2030, que esta vez sí permita la incorporación de los refrigerantes naturales en todas las aplicaciones.

# REFERENCIAS

ABAS N. [et al.]. Natural and synthetic refrigerants, global warming: A review. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018, no 90, 557-569

Bitzer, 2014. New EU F-GAS Regulation [consulta: mayo 2018]. Disponible en: [https://www.bitzer.de/shared\\_media/documentation/a-510-1-2.pdf](https://www.bitzer.de/shared_media/documentation/a-510-1-2.pdf)

Bitzer, 2016. Refrigerant Report 19 [consulta: mayo 2018]. Disponible en: [https://www.bitzer.de/shared\\_media/documentation/a-501-19.pdf](https://www.bitzer.de/shared_media/documentation/a-501-19.pdf)

CALM, J.M. Emissions and environmental impacts from air-conditioning and refrigeration systems. En: *International Journal of Refrigeration*. 2002, no 25, pp. 293-305

CALM, J. M. The next generation of refrigerants – Historical review, considerations, and outlook. En: *International Journal of Refrigeration*. 2008, no 31, pp. 1123-1133

CICONKOV, R. Refrigerants: There is still no vision for sustainable solutions. En: *International Journal of Refrigeration*. 2017, no 86, pp. 441-448

COMISIÓN EUROPEA, 2017. *Informe de la Comisión sobre la evaluación de asignación de cuotas de conformidad con el Reglamento (UE) n.º 517/2014* [consulta: abril 2018]. Disponible en: <https://publications.europa.eu/es/publication-detail/-/publication/d8b0c775-67a8-11e7-b2f2-01aa75ed71a1/language-es/format-PDF>

ERNESTO RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ. *Los Refrigerantes en las Instalaciones Frigoríficas*. Madrid: Thomson Paraninfo, 2005. ISBN: 84-283-2890-0

EPA, 2010. Transitioning to low-GWP alternatives in commercial refrigeration [consulta: mayo 2018]. Disponible en: [https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/transitioning\\_to\\_low-gwp\\_alternatives\\_in\\_commercial\\_refrigeration.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/transitioning_to_low-gwp_alternatives_in_commercial_refrigeration.pdf)

a) Gas Servei, 2018. Fluorados: importante novedad en el proyecto de ley de presupuestos 2018 en España [consulta: abril 2018]. Disponible en: <https://www.gas-servei.com/es/gas-servei-hoy/fluorados--importante-novedad-en-el-proyecto-de-le>

b) Gas Servei, 2018. Restricciones y prohibiciones de la F-Gas Regulation al uso de refrigerantes fluorados comercializados por Gas Servei en los distintos sectores y subsectores [consulta: abril 2018]. Disponible en: [https://www.gas-servei.com/images/Restricciones\\_F\\_GAS.pdf](https://www.gas-servei.com/images/Restricciones_F_GAS.pdf)

GIZ PROKLIMA. Refrigeration, air conditioning and foam blowing sectors technology roadmap [consulta: mayo 2018]. Disponible en: [http://unfccc.int/ttclear/misc/StaticFiles/gnwoerk\\_static/TEM\\_tec\\_cfi\\_rm/993ecd6a67144e68b88b4735ea50fcf0/647faa714484a2983fe6851111ab9aa.pdf](http://unfccc.int/ttclear/misc/StaticFiles/gnwoerk_static/TEM_tec_cfi_rm/993ecd6a67144e68b88b4735ea50fcf0/647faa714484a2983fe6851111ab9aa.pdf)

INTARCON, 2017. La “fractura” de los refrigerantes [consulta: abril 2018]. Disponible en: <http://www.intarcon.com/la-fractura-de-los-refrigerantes/>

IPCC. *Climate Change 1995. The Science of Climate Change*. Cambridge, 1995, p. 14. ISBN: 0-521-56433-6

IPCC. *Cambio climático 2014. Informe de síntesis* [consulta: mayo 2018]. Disponible en: [https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/index\\_es.shtml](https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/index_es.shtml)

Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera.

Mineco, 2018. Real Decreto XX/2018, de XX de XX, por el que se aprueban el Reglamento de seguridad para instalaciones frigoríficas y sus instrucciones técnicas complementarias [consulta: mayo 2018]. Disponible en:

<http://www.mineco.gob.es/portal/site/mineco/menuitem.32ac44f94b634f76faf2b910026041a0/?vgnnextoid=032fc3950f1e2610VgnVCM1000001d04140aRCRD>

MOLINA, M. y ROWLAND, F.S. Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atomc-atalsed destruction of ozone. En: *Nature*. 1974, vol. 249, pp- 810-812

MOTA-BABILONI, A. [et al.]. Analysis bases on EU Regulation No 517/2014 of new HFC/HFO mixtures as alternatives of high GWP refrigerants in refrigeration and HVAC systems. En: *International Journal of Refrigeration*. 2015, no 52, pp. 21-31

MOTA-BABILONI, A. [et al.]. A review of refrigerant R123ze(E) recent investigations. En: *Applied Thermal Engineering*. 2016, no 95, pp. 211-222

MOTA-BABILONI, A. [et al.]. Recent investigations in HFCs substitution with lower GWP synthetic alternatives: Focus on energetic performance and environmental impact. En: *International Journal Of Refrigeration*. 2017, no 82, pp. 288-301

RAJECKI, R. The Kigali HFC Amendment and its Potencial Worldwide Impact. En: *Air Conditioning, Heating and Refrigeration News*. 2016, Tomo 259, no 15, pp. 22-24

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.

Real Decreto 138/2011, de 4 de febrero, por el que se aprueban el Reglamento de seguridad para instalaciones frigoríficas y sus instrucciones técnicas complementarias.

REGLAMENTO (UE) N° 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) n° 842/2006

Secretaría de Ozono, 2018. Centro de base de datos [consulta: mayo 2018]. Disponible en: <http://ozone.unep.org/en/data-reporting/data-centre>

Secretaría de Ozono, 2018. El Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono [consulta: abril 2018]. Disponible en: <http://ozone.unep.org/es/manual-del-protocolo-de-montreal-relativo-las-sustancias-que-agotan-la-capa-de-ozono/5>

UNE-EN 378-1:2016. Sistemas de refrigeración y bombas de calor. Requisitos de seguridad y medioambientales. Parte 1: Requisitos básicos, definiciones, clasificación y criterios de elección.

WANG, SHAN KOU. *Handbook of air conditioning and refrigeration*. Segunda edición. New York: McGraw-Hill, 2001. ISBN: 0070681678

WILBERT F. STOECKER. *Industrial refrigeration handbook*. New York: McGraw-Hill, 1998. ISBN: 007061623X