

Trabajo de Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Fluidos Refrigerantes: Análisis de la Normativa
Internacional

Autor: Pablo Enrique Rodríguez de Arriba

Tutor: Juan Francisco Coronel Toro

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

Sevilla, 2020



Trabajo de Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Fluidos Refrigerantes: Análisis de la Normativa Internacional

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, 2020

Trabajo de Fin de Máster: Fluidos Refrigerantes: Análisis de la Normativa Internacional

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, 2020

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

Muchas gracias a Don Juan Francisco Coronel Toro por dirigirme tanto el Trabajo Fin de Grado como este Trabajo con el que pongo fin a mis estudios como Ingeniero Industrial.

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

Pablo Enrique Rodríguez de Arriba

Sevilla, 2020

La importancia de la tecnología frigorífica es incuestionable. Sus principales campos de actuación son la refrigeración y la climatización. En el caso de la refrigeración, es crucial, por ejemplo, para mantener la cadena de frío de los alimentos perecederos o para preservar los medicamentos. Por su parte, la climatización es esencial en el día a día para mantener la temperatura, así como otras variables de los locales, dentro de unos límites confortables.

El actor principal de la tecnología frigorífica son los refrigerantes. En mi Trabajo Fin de Grado (P.E. Rodríguez, 2018) describí la problemática medioambiental que afecta a estos fluidos y analicé la viabilidad de las alternativas menos contaminantes desde el punto de vista del Reglamento de Seguridad de las Instalaciones Frigoríficas de 2011, de aplicación en España.

Este Trabajo Fin de Máster es una continuación natural de ese trabajo. Por un lado, se amplía y contextualiza la problemática medioambiental con la descripción de la Enmienda de Kigali, que entró en vigor en 2019, y con los Reglamentos de diferentes países para hacer cumplir los objetivos de esta Enmienda al Protocolo de Montreal. Se han analizado las políticas en materia de control de los gases fluorados de los siguientes países:

- Unión Europea,
- Estados Unidos,
- Canadá,
- Japón,
- Australia,
- China.

Por otro lado, se ha analizado las posibilidades que las tres principales normas de seguridad para instalaciones frigoríficas, el ASHRAE 15 para Estados Unidos, la norma EN 368:2016 en Europa y la ISO 5149:2014, permiten a los llamados refrigerantes alternativos. Este estudio se ha hecho para los principales sectores de la tecnología frigorífica, considerando para cada uno los sistemas y equipos más utilizados:

- refrigeración doméstica,
- refrigeración comercial,
- refrigeración industrial,
- refrigeración de cámaras frigoríficas,
- climatización residencial,
- climatización en comercios,
- climatización de grandes edificios.

La historia de los refrigerantes es muy desafortunada. La primera generación, utilizada hasta 1930, fueron fluidos encontrados en la naturaleza como el amoníaco. La tecnología de esa época no estaba preparada para hacer frente a los problemas de inflamabilidad y toxicidad de estos fluidos, estando los accidentes al orden del día. La segunda generación comenzó con la invención de los refrigerantes sintéticos CFC y HCFC, que no tenían los problemas de seguridad de los naturales. Sin embargo, a partir de la década de los 70 se descubrió que estos refrigerantes clorados provocan un terrible daño medioambiental: la destrucción de la capa de ozono. La respuesta internacional llegó en 1989 con el Protocolo de Montreal y supuso la transición de estos CFC y HCFC a la actual generación de refrigerantes, la tercera, los HFC.

El Protocolo de Montreal establece un calendario de reducción para el consumo y la producción de estos gases

clorados. Se diferenci6 entre los pa6ses m6s desarrollados y los pa6ses en v6as de desarrollo, entre los que se encuentra China. Los CFC se abandonaron en 1996 en el primer grupo y en 2010 en los segundos. Con respecto a los HCFC, la reducci6n se complet6 en 2020 para los pa6ses m6s desarrollados, pero no culminar6 hasta 2030 para los pa6ses en v6as de desarrollo. El abandono de los HCFC no se est6 consiguiendo tan r6pido como se hab6a previsto. Esto se debe al crecimiento tan inesperado como espectacular que China ha experimentado desde principios de siglo. En la Figura I se muestra el consumo mundial de HCFC y el consumo restando las emisiones de las que China es responsable. Se observa como China, a pesar de ser un pa6s m6s de los 147 que conforman el grupo de los pa6ses en v6as de desarrollo, aglutina m6s de la mitad del consumo de HCFC a nivel mundial. De no ser por China, el m6ximo hist6rico de consumo de estas sustancias se habr6a alcanzado entre 1996 y 1999, coincidiendo con el a6o de congelaci6n del consumo de HCFC en los pa6ses fuera del art6culo 5, y estar6amos actualmente en unos niveles de consumo casi un 60% inferiores. En mi opini6n, esto supone un fracaso del Protocolo de Montreal.

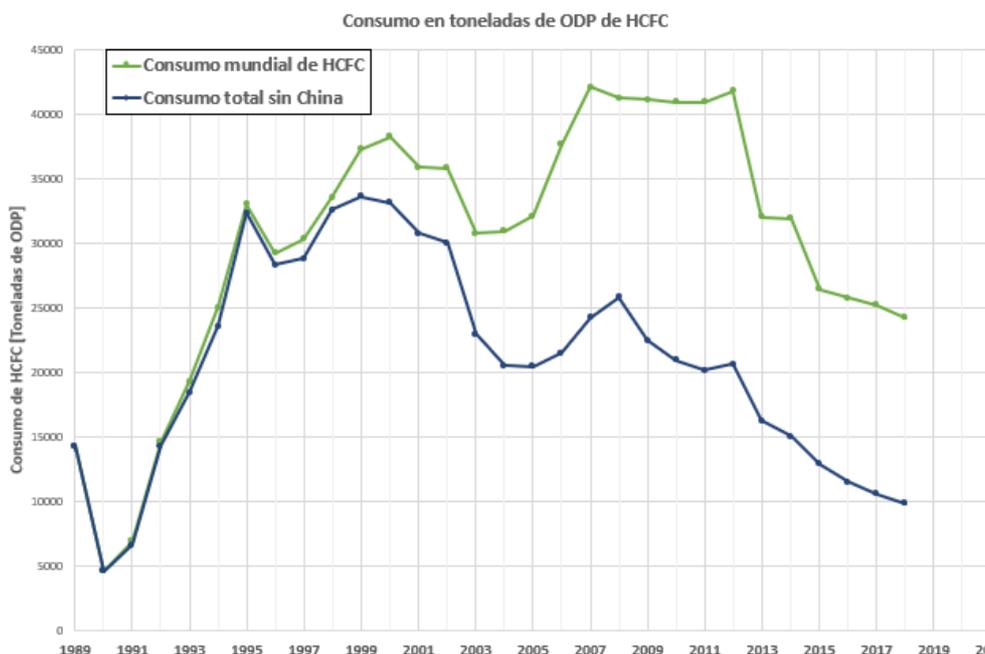


Figura I. Comparaci6n del consumo mundial de HCFC con el consumo si restamos las emisiones de China [UNEP, 2019b)]

La situaci6n en la que nos encontramos hoy es un “d6j6 vu” de lo ya vivido. Las 6ltimas investigaciones cient6ficas demuestran que el fl6or de los HFC tiene un efecto en el calentamiento atmosf6rico cientos o miles de veces peor que el del CO₂. La Enmienda de Kigali de 2016 llama a abandonar estos refrigerantes y encontrar la cuarta generaci6n. El objetivo para el grupo de los pa6ses m6s desarrollados es alcanzar una reducci6n de las emisiones al 85% para 2036, mientras que para el resto de los pa6ses esta reducci6n no se conseguir6 hasta diez a6os m6s tarde.

En la web de Green Cooling Initiative (2020) encontramos estimaciones de las emisiones de HFC para cada pa6s del mundo, tanto en valores absolutos como per c6pita. Estos datos se resumen para una serie de pa6ses representativos en la Tabla I. Se observa como China es el pa6s con m6s emisiones directas de estos gases, superando por m6s del doble a la Uni6n Europea y Estados Unidos, que ocupan el segundo y tercer puesto. A mucha distancia de estos tres se encuentran Jap6n y Rusia. Estos cinco pa6ses suponen el 63% de las emisiones directas a nivel mundial.

Si nos fijamos en datos de emisiones por habitante vemos que los valores est6n m6s equilibrados. El liderato es de Australia con 409 kg de CO₂ per c6pita, seguido muy de cerca por Jap6n (403 kg per c6pita), los Estados Unidos (399 kg per c6pita) y Canad6 (383 kg per c6pita). En un nivel inferior est6 la Uni6n Europea con 318 kg per c6pita, similar a Rusia. Sorprende China que, a pesar de ser el principal emisor mundial, tan solo es responsable de 249 kg por habitante.

Tabla I. Impacto directo absoluto y per cápita de los HFC para los principales países

País	Emisión directa (Mton CO ₂)	Emisión directa (kg CO ₂ per cápita)
China	351	249
Unión Europea	142	318
Estados Unidos	131	399
Japón	51	403
Rusia	45	318
Canadá	13.9	383
Australia	9.9	409

Según esta misma web, las emisiones totales en 2020 de refrigerantes fluorados ascienden a 3830 Mton equivalentes de CO₂. Sin embargo, hay que resaltar que más de un 70% de estas emisiones es impacto indirecto asociado a la producción de la electricidad consumida por estas instalaciones. En otras palabras, es tan urgente reducir las emisiones directas de los refrigerantes como mejorar la eficiencia energética de las instalaciones y ampliar el parque renovable de la Red Eléctrica.

La Enmienda de Kigali tan solo establece los objetivos a cumplir, pero es cada territorio quien debe formalizar un plan concreto de actuación para darle cumplimiento. Los Reglamentos analizados en este trabajo se recogen en la Tabla II. Se aprecia que la Unión Europea, Canadá, Japón y Australia tienen unos Reglamentos específicos para regular los HFC. Con respecto a Estados Unidos, hay que aclarar que aún no ha ratificado la Enmienda de Kigali y, sin embargo, los HFC están siendo regulados a través del programa SNAP. Por último, China, a pesar de ser el país del mundo con más emisiones de estos gases, tan solo cuenta con unas recomendaciones del Gobierno para apostar por refrigerantes menos contaminantes.

Tabla II. Reglamentos de control de los gases fluorados para los principales territorios

País	Reglamento
Unión Europea	Reglamento 517/2014, también conocido como Reglamento F-Gas
Estados Unidos	Programa SNAP
Canadá	(Regulations Amending the) Ozone-depleting Substances and Halocarbon Alternatives Regulations
Japón	Act on Rational Use and Proper Management of Fluorocarbons
Australia	Ozone Protection and Synthetic Greenhouse Gas Management Act
China	Recomendaciones del Gobierno por sectores a corto y largo plazo

Estos Reglamentos suelen actuar de dos maneras. La primera medida, establecida en la Unión Europea, Canadá y Australia, es establecer un sistema de cuotas para forzar a cumplir los objetivos de reducción de la Enmienda de Kigali. De esta manera, se pasa el problema a los importadores y fabricantes de gases y equipos cargados, y se les fuerza a reducir su consumo de HFCs mediante tecnología libre de ellos o gases regenerados. En la figura II se comparan los calendarios de reducción de HFC de la Enmienda de Kigali y el Reglamento 517/2014 de la Unión Europea, que como se observa es significativamente más estricto.

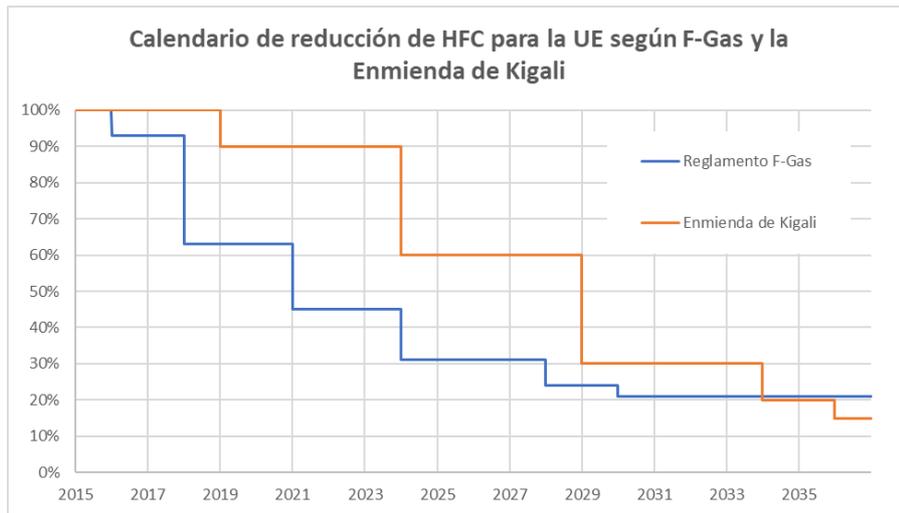


Figura II. Comparación entre los calendarios de reducción de HFC de la Enmienda de Kigali y el Reglamento 517/2014 de la Unión Europea

Tal y cómo señala Intarcon (2019) este sistema de cuotas alteró el mercado de refrigerantes. Ocurrió que, ante el temor de no poder hacer frente a la reducción al 63% de 2018, los proveedores de aparatos cargados con GFEI adquirieron numerosas autorizaciones de cuota durante 2017. De este miedo se aprovecharon las empresas con cuotas asignadas, que especularon con ellas provocando una escala de precios (figura III), que hoy en día ronda los 20€ por kg equivalente de CO₂.

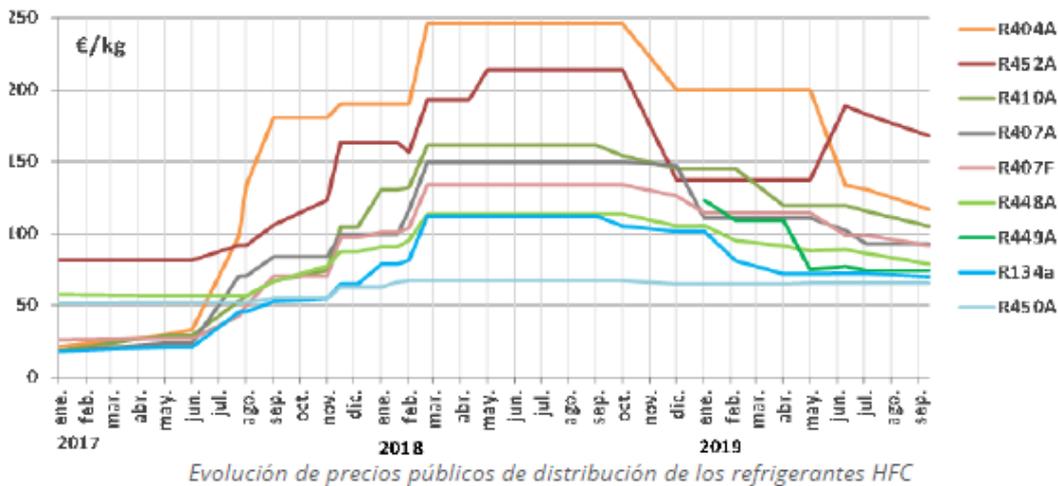


Figura III. Evolución de los precios de refrigerante desde 2017 a 2019 [Intarcon, 2019]

La segunda forma de actuar es estableciendo unas hojas de ruta para vetar a los gases refrigerantes de alto GWP en aplicaciones donde el estado de la tecnología permita alternativas de menor impacto medioambiental en el corto plazo. Estas restricciones aparecen de manera explícita en los Reglamentos de la Unión Europea, Japón y Canadá, pero hay que inferirlo en el caso del programa SNAP de los Estados Unidos.

El Significant New Alternatives Policy (SNAP) es un programa de evaluación de alternativas de la EPA. Entre las sustancias que analiza se encuentran los refrigerantes. El SNAP es una lista dinámica cuyo objetivo es discernir cuáles son las mejores alternativas disponibles atendiendo a criterios de seguridad y de protección del medio ambiente. De esta manera, la SNAP puede clasificar los refrigerantes según cuatro categorías:

- Aceptable: la alternativa reduce los riesgos medioambientales y de seguridad, por lo que puede usarse sin restricciones desde el punto de vista de la SNAP.
- Aceptable sujeto a condiciones de uso: la alternativa es aceptable solo si se cumplen ciertos requisitos como medidas especiales de seguridad o limitación de carga.
- Aceptable para usos muy acotados: la alternativa es aceptable, pero solo para una aplicación muy concreta, principalmente porque no existen otras alternativas viables.

- Inaceptable: existen alternativas disponibles que no conllevan tantos riesgos para la salud humano o para el medio ambiente, por lo que no podrán emplearse a partir de una cierta fecha.

De forma práctica, las categorías “aceptable sujeto a condiciones de uso” y “aceptable para usos muy acotados” se consideran una sola, “aceptable con restricciones de uso”.

El SNAP estudia el binomio refrigerante – uso final, es decir, la decisión de clasificar un refrigerante como aceptable, aceptable con restricciones de uso o inaceptable depende del resto de alternativas tecnológicamente viables en cada aplicación considerada. Por este motivo, el sector de refrigeración y acondicionamiento de aire se ha dividido en dieciséis usos finales. En el presente Trabajo Fin de Máster se han analizado las leyes que afectan a los seis usos finales más importantes:

- chillers para climatización,
- refrigeración doméstica,
- refrigeración comercial,
- refrigeración industrial,
- MVACs,
- equipos autónomos de climatización.

Hay que destacar que estas leyes no están exentas de polémica. De hecho, han sido recurridas en varios estados de los Estados Unidos. La razón es que el programa SNAP surgió para encontrar alternativas a los gases que agotaban la capa de ozono, es decir, para dar respuesta al Protocolo de Montreal. Conseguido esto ya con el abandono de los CFC y los HCFC, hay quien considera que la EPA no tiene autoridad para vetar fluidos atendiendo única y exclusivamente a su GWP. No cabe ninguna duda, sin embargo, de que estas leyes acabaran más tarde o más temprano entrando en vigor.

Como se observa en la Tabla III las hojas de ruta son diferentes en cada territorio. Esto se debe a que estas restricciones están adaptadas a la situación de cada país: los sectores más contaminantes, la tecnología más extendida y el estado de la nueva tecnología desarrollada, entre otros factores. Se busca con esta medida guiar el desarrollo de tecnología medioambientalmente más sostenible.

En el sector de la refrigeración doméstica los equipos más utilizados son frigoríficos y congeladores. Habrá que abandonar el refrigerante más empleado que es el R-134a para buscar refrigerantes de muy bajo GWP. En la práctica, la industria ya ha cambiado al R-600a, que es un hidrocarburo con GWP prácticamente nulo.

Con respecto a los MVACs, los cuatro reglamentos analizados coinciden en restringir el GWP a 150. De nuevo, esto es un veto directo al R-134a. La alternativa más aceptada es el R-1234yf (GWP 4), aunque también se emplea R-744.

En refrigeración comercial los refrigerantes más empleados son el R-404A (GWP 3922), el R-407A (GWP 2107) y el R-134a (GWP 1430). Distinguimos entre tres tipos de sistemas.

- Los frigoríficos y congeladores comerciales son unidades autónomas compactas muy empleadas en pequeños comercios, pero también en supermercados. El R-404A y el R-407A estarán prohibidos. El R-134a podrá usarse en frigoríficos comerciales en Japón y en congeladores comerciales en Estados Unidos, Japón y Canadá.
- Las unidades de condensación remota son sistemas partidos con el evaporador en un mueble frigorífico y el condensador y compresor en el exterior. Son los sistemas más empleados en supermercados, aunque también se utilizan en pequeños comercios como restaurantes para no evacuar el calor al interior del local. Los cuatro reglamentos coinciden en vetar al R-404A. El R-407A podrá seguir utilizándose en la Unión Europea, Estados Unidos y Canadá, pero no en Japón. Por su parte, el R-134a no tendrá restricciones.
- Las centrales frigoríficas con instalaciones centralizadas con los compresores en una sala de máquinas. Pueden ser de expansión directa si distribuyen el refrigerante al local o indirectas si el refrigerante está confinado en una sala de máquinas y utilizan un fluido secundario. También existen centrales frigoríficas con sistemas en cascada. Se emplean en grandes superficies comerciales. De nuevo, el R-404A está prohibido por todos los reglamentos. El R-407A puede utilizarse en Estados Unidos y Canadá. El R-134a, además de en los dos anteriores, podrá emplearse en la Unión Europea el sector de

alta presión de sistemas en cascada. Destacan unos límites muy estrictos de 100 kg equivalentes de CO₂ en Japón y 150 en la Unión Europea, lo que claramente obliga a buscar refrigerantes naturales o de muy bajo GWP.

Tabla III. Comparación entre las restricciones establecidas en la Unión Europea, los Estados Unidos, Japón y Canadá

Aplicación	Unión Europea	Estados Unidos	Japón	Canadá
Refrigeración doméstica	< 150 desde 2015	< 630 desde 2021	Ninguna	< 150 desde 2025
Frigoríficos de uso comercial	< 2500 desde 2020, < 150 desde 2022	< 630 desde 2020	< 1500 desde 2025	< 1400 desde 2020
Congeladores de uso comercial	<2500 desde 2020, < 150 desde 2022	< 1510 desde 2020	< 1500 desde 2025	< 1500 desde 2020
Unidades de condensación	< 2500 desde 2020	< 2630 desde 2018	< 1500 desde 2025	< 2200 desde 2020
Centrales frigoríficas	<2500 desde 2020, < 150 desde 2022, excepto < 1500 en refrigerante primario de sistemas en cascadas	< 2630 desde 2017	< 100 desde 2019	< 2200 desde 2020
Aparatos portátiles de A/C	< 150 desde 2020	Ninguna	Ninguna	Ninguna
Aparatos de A/C Splits	< 750 desde 1 de enero de 2025	Ninguna	< 750 desde 2018	Ninguna
Aparatos de A/C para comercios	Ninguna	Ninguna	< 750 desde 2020 para equipos de menos de 15 kW, < 750 desde 2023 para resto	Ninguna
Enfriadoras de agua para climatización	<2500 desde 2020	< 630 desde 2024	< 100 desde 2025	< 750 desde 2025
MVACs	< 150 desde 2017	< 150 desde 2021	< 150 desde 2023	< 150 desde 2021

En climatización distinguimos entre sistemas centralizados y sistemas autónomos. En los centralizados el refrigerante está confinado en una enfriadora de agua o bomba de calor, distribuyéndose a los locales agua de alimentación para los fancoils o aire tratado por el agua en una climatizadora. En los autónomos el aire del local se acondiciona directamente por el refrigerante mediante un equipo que puede ser rooftop (equipo compacto situado en el exterior), aparato portátil de A/C, equipos partidos Splits, equipos compactos horizontales de falso techo o un sistema VRF (Variable Refrigerant Flow), principalmente. Las restricciones apuntan a limitar el GWP en todos sus sistemas a menos de 750. La consecuencia de esto es prohibir todos los refrigerantes empleados hasta ahora: el R-410A (GWP 2088), el R-407C (GWP 1774) y el R-134a (GWP 1430). La Unión Europea ha establecido un límite de 150 en aparatos portátiles de aire acondicionado, donde tendrán que utilizarse hidrocarburos.

En la industria lo más frecuente es utilizar torres de condensación, que no emplean refrigerante, sino que se basan en el principio de enfriamiento evaporativo. No obstante, cuando es necesario bajas temperaturas se utilizan enfriadoras de líquido con refrigerantes naturales como el R-717 (amoníaco) o el R-290 (propano), por lo que no es necesario establecer restricciones en este sector.

Con respecto a las cámaras frigoríficas, encontramos equipos compactos monoblock y sistemas partidos. Los refrigerantes más utilizados son el R-134a, el R-404A y, en equipos compactos, el R-290. De estos fluidos, solo el R-404A estará prohibido.

Es inevitable preguntarse si ya existen refrigerantes alternativos que permitan sustituir a los HFC con garantías. La historia de la refrigeración pone de manifiesto que no existe el refrigerante perfecto. La elección de un refrigerante para una aplicación determinada es un compromiso entre sus propiedades termodinámicas, su impacto medioambiental, sus características de inflamabilidad y toxicidad, y su coste. Además, estas propiedades están relacionadas y son incluso contrapuestas. Por ejemplo, los fluidos más contaminantes suelen también tener un coste elevado, pero habitualmente estos refrigerantes consiguen un mejor rendimiento energético, lo que reduce el coste del ciclo de vida y también el impacto medioambiental indirecto. Por otro lado, los mejores refrigerantes desde el punto de vista medioambiental suelen ser inseguros para las personas.

Es por esto último que la transición que ahora se inicia para reemplazar a los HFC por refrigerantes de menor GWP va a ser compleja. En la Figura IV se muestra para los principales refrigerantes su GWP frente al RCL, que es la máxima concentración admisible en un local habitado para que no haya problemas de toxicidad, inflamabilidad o desplazamiento de oxígeno. Se agrupan los refrigerantes en cuatro categorías: HFCs convencionales, HFCs de bajo GWP, refrigerantes naturales y refrigerantes HFOs. Interesan aquellos refrigerantes que se encuentren lo más próximo posible a la esquina inferior derecha, es decir, los que tengan un bajo GWP y un alto RCL. Sin embargo, se intuye una relación lineal entre el GWP y el RCL. Esto significa que cuánto menos contaminante es un refrigerante, más peligroso resulta.

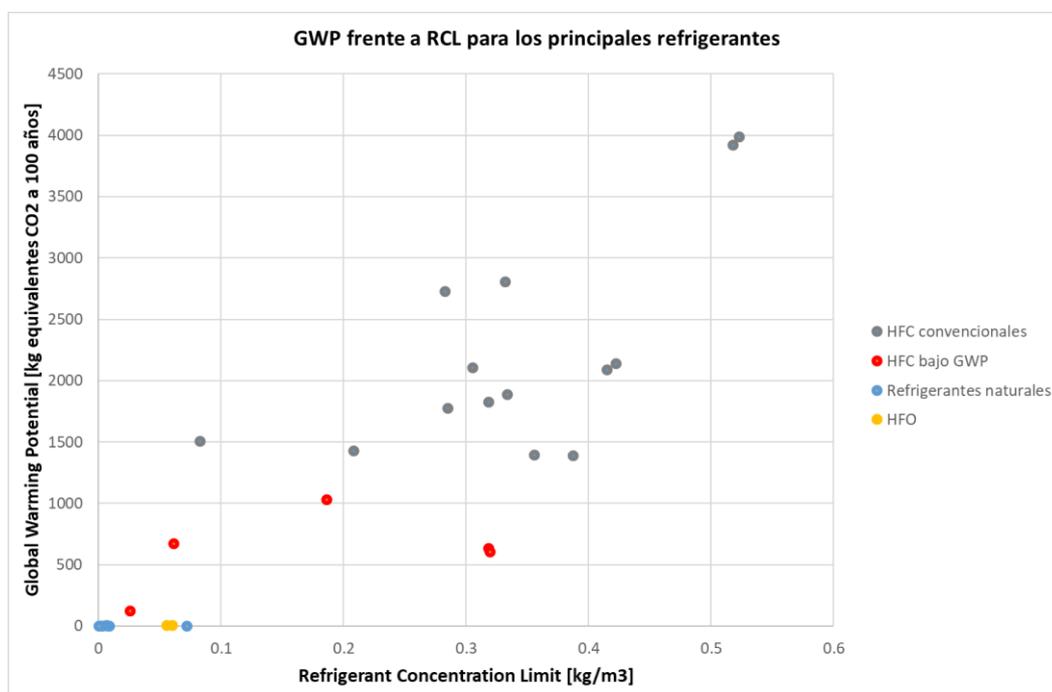


Figura IV. Relación entre el GWP y el RCL para los principales refrigerantes

Por tanto, para garantizar el éxito de esta transición a refrigerantes respetuosos con el medio ambiente será necesario desarrollar:

- Una tecnología preparada para trabajar con pequeñas cargas y minimizar las fugas de refrigerante.
- Estándares que garanticen la seguridad en las instalaciones.
- Reglamentos nacionales que no prohíban el uso de refrigerantes por ser tóxicos y/o inflamables y los permitan en cantidades suficientes.

Y es que todos los refrigerantes son seguros si se emplean de acuerdo con las medidas de seguridad de un estándar de buenas prácticas. En la Figura V se representa esquemáticamente la jerarquía de los diferentes estándares empleados en la tecnología frigorífica. Al mayor nivel encontramos los “estándares de refrigerante”, en los que se clasifican y definen las propiedades de estos fluidos. Basados en estos surgen los “estándares horizontales”, que establecen las condiciones de seguridad para todos los sectores de la tecnología frigorífica, y

los “estándares verticales”, que tan solo aplican a un reducido conjunto de equipos compactos y semicompactos. Por último, los Reglamentos nacionales, que emanan de los “estándares horizontales” y son los únicos de obligado cumplimiento.

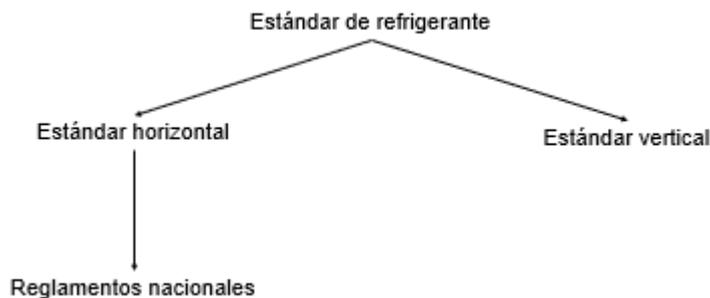


Figura V. Jerarquía de los estándares en la tecnología frigorífica

Los dos estándares más importantes que clasifican a los refrigerantes son la norma ASHRAE 34 para Estados Unidos y la ISO 817:2014 para el resto del mundo. Estas dos normas son idénticas en cuanto a la denominación alfanumérica de los refrigerantes y la clasificación de estos en función de su toxicidad e inflamabilidad (ver Tabla IV). Se observa que ambas normas reconocen dos clases de toxicidad y cuatro grupos de inflamabilidad, incluyendo la importantísima categoría de baja inflamabilidad 2L. Sin embargo, difieren en la definición del parámetro llamado Refrigerant Concentration Limit (RCL). Este parámetro aúna los riesgos de toxicidad, inflamabilidad y desplazamiento del oxígeno. Se calcula como el mínimo entre el ATEL (Límite de exposición de toxicidad aguda), el ODL (límite de anoxia) y el FCL (límite de concentración de inflamabilidad). Es en el FCL donde se distancian las dos normas: la ISO 817:2014 lo define como el 20% del LFL (límite inferior de inflamabilidad), mientras que el ASHRAE 34 como el 25% del LFL. Además, se han observado diferencias en el LFL de ciertos refrigerantes. Como consecuencia de todo esto, puede afirmarse que en los refrigerantes inflamables el RCL de la norma ASHRAE 34 es superior al de la ISO 817:2014.

Tabla IV. Clases de seguridad de los refrigerantes.

		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	

Las tres normas más importantes a nivel mundial sobre seguridad en las instalaciones frigoríficas son la ISO 5149:2014, la europea EN 378:2016 y la americana ASHRAE 15:2019. Las dos primeras están armonizadas, luego en esencia solo hay dos normas diferentes. En este trabajo se ha analizado el procedimiento para determinar la carga máxima de refrigerante permitida.

El procedimiento de la norma EN 378:2016 consiste en determinar una carga por toxicidad y otro por inflamabilidad, siendo la carga máxima permitida la menor de las dos. Para determinar estas cargas hay que considerar las clasificaciones hechas a los locales (tres tipos según su acceso) y a los emplazamientos dónde se

instalen los equipos (cuatro clases). A partir de esta información, y según las clases de la Tabla IV, se puede entrar en unas tablas para determinar la carga máxima. Estas tablas han sido discutidas con detalle en el trabajo. Existe un método particular para las aplicaciones de climatización con sistemas autónomos que determina la carga máxima en función de la altura de instalación del equipo y la superficie acondicionada. También existe un procedimiento alternativo solo para emplazamientos de clase II que utilicen refrigerantes de seguridad A1 o A2L que cumplan ciertas condiciones constructivas. Si se añaden ciertas medidas de seguridad específicas es posible aumentar la carga máxima de refrigerante a hasta 150 kg para refrigerantes de clase A1 o en torno a 58.5 kg para los refrigerantes de clase A2L.

En la Figura VI se compara la carga máxima permitida para un aparato Split en vivienda que use R-32 según el método estándar y el método alternativo. Se observa como claramente el procedimiento alternativo permite cargas muy superiores al general a partir de los 30 m² de superficie acondicionada. Instalar una medida de seguridad adicional es siempre favorable, mientras que instalar dos medidas adicionales solo interesa por debajo de 140 m².

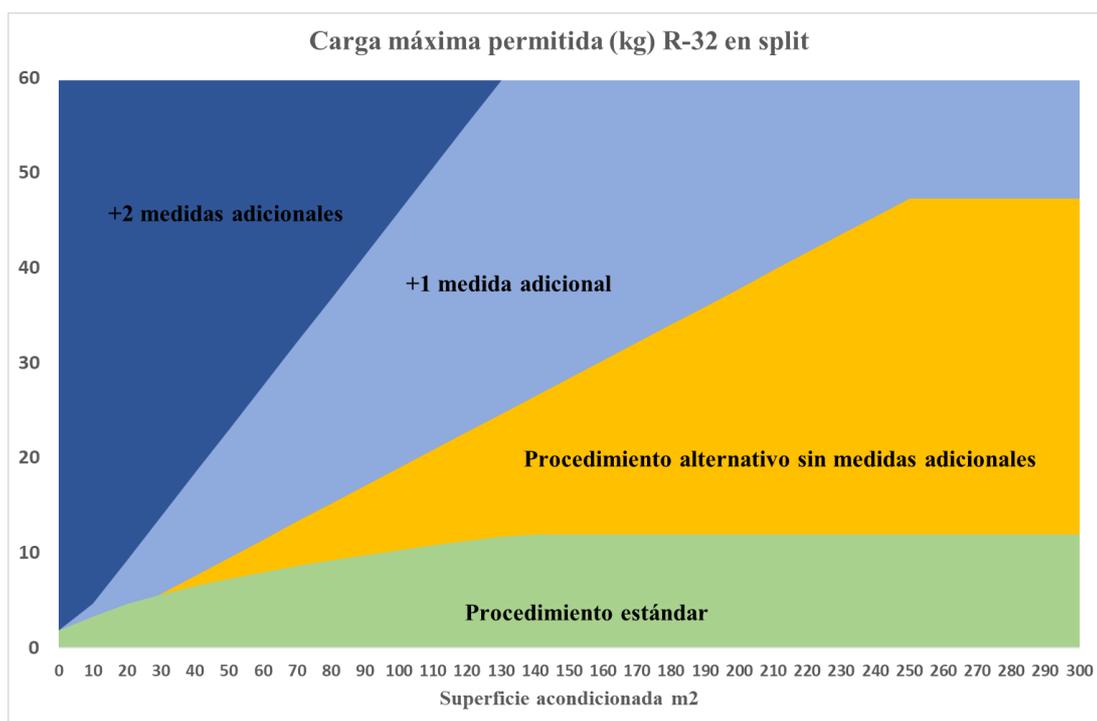


Figura VI. Comparación de la carga máxima permitida para un aparato de aire acondicionado Split con R-32 en una vivienda por el procedimiento estándar y el procedimiento alternativo

Por su parte, el ASHRAE 15 no diferencia entre carga por toxicidad e inflamabilidad, sino que la carga se calcula como el producto del volumen del local por el RCL. Existen sistemas, no obstante, que no tienen límite de carga como los llamados sistemas de baja probabilidad, es decir, aquellos en los que una fuga de refrigerante nunca pueda terminar en el espacio habitado, o las instalaciones en edificios industriales y cámaras frigoríficas, entre otros. Por el contrario, en los llamados edificios de uso institucional, como hospitales, guarderías o prisiones, la carga está reducida a un 50% del producto anterior. Hay que destacar que en aplicaciones de climatización solo están permitidos los refrigerantes de los grupos A1 y A2L. Además, los refrigerantes inflamables de clase A3 y B3 no pueden emplearse sin la aprobación de la autoridad local competente es sistemas con más de 150 gramos. El resto de la casuística queda descrita con detalle en el trabajo.

Entre los “estándares verticales” más importantes destacan el IEC 60335-2-24 para refrigeración doméstica, el IEC 60335-2-40 para climatización y el IEC 60335-2-89 para refrigeración comercial. Los estándares IEC (Internacional Electrotechnical Commission) son internacionales; en la Unión Europea estas normas fueron adoptadas por el Comité Europeo de Normalización Electrotécnica (CENELEC) en las normas EN 60335-2-24, EN 60335-2-40 y EN 60335-2-89, respectivamente. En Estados Unidos los estándares verticales los redacta Underwriters Laboratories (UL) con su UL 60335-2-24 para refrigeración doméstica, el UL 484 para A/C en viviendas, el UL 60335-2-40 para climatización en el resto de los locales y el UL 471 para refrigeración comercial.

Los “estándares verticales” son especialmente importantes a la hora de limitar la carga máxima de refrigerantes

inflamables, como son los hidrocarburos, en algunos equipos compactos y semicompactos concretos. Los estándares de IEC, EN y UL se comparan en la Tabla V.

Tabla V. Comparación de la carga máxima permitida en hidrocarburos en los principales estándares verticales

Aplicación	IEC	EN	UL
Refrigeración doméstica	150 g	150 g	150 g
Refrigeración comercial	500 g (última versión de 2019)	150 g	150 g
Climatización	5 kg enfriadoras, 1 kg en Split y 0.3 kg en A/C portátiles	5 kg enfriadoras, 1 kg en Split y 0.3 kg en A/C portátiles	115 g máximo

Los reglamentos nacionales europeos se basan en la norma EN 378:2016. En España, el 27 de septiembre de 2019 se aprobó un nuevo Reglamento de Seguridad para Instalaciones Frigoríficas mediante el Real Decreto 552/2019. Este nuevo RSIF adapta la normativa española a la versión de 2016 de la norma EN 378. Con respecto a la versión anterior, se permiten cargas superiores para todos los refrigerantes diferentes al grupo de seguridad A1. Aunque los más beneficiados son los de la nueva categoría A2L, también hay una mejora en los requisitos exigidos a los hidrocarburos. Por ejemplo, el artículo 2 establece los mínimos de carga por debajo de los cuales los sistemas frigoríficos están exentos de cumplir el Reglamento. Estos mínimos son:

- 2.5 kg para refrigerantes del grupo L1,
- en torno a 1.8 kg para los de clase A2L,
- 0.5 kg para el resto de los refrigerantes del grupo L2,
- 0.5 kg para los del grupo L3.

Nótese que en el anterior RSIF el mínimo para los refrigerantes del grupo A2L era 0.5 kg y para los del grupo L3 era tan solo 0.2 kg. Si se compara el mínimo actual de los hidrocarburos con las cargas máximas permitidas para estos fluidos en los estándares verticales se concluye que el RSIF español no establece barreras adicionales al uso de estos refrigerantes en equipos compactos.

Además, se eliminan otras barreras existentes a las instalaciones con refrigerantes A2L como la obligatoriedad del titular de contratar un seguro de responsabilidad civil de 500 000€, entre otras. También se han analizado en este trabajo la normativa de Francia, Alemania, Italia, Bélgica, Austria y Reino Unido.

En Estados Unidos cada estado tiene su propio código de edificación. Se ha analizado el International Building Code (IBC) que es un código desarrollado por el International Code Council (ICC) con ánimo de servir de base para el resto de los reglamentos estatales. Se observa que la última versión del IBC, de 2018, está muy armonizada con el actual ASHRAE 15. La única diferencia significativa es que el IBC sí permite refrigerantes de las clases A2 y A3 en climatización, en contraste con el ASHRAE 15 que tan solo permite los refrigerantes A1 y A2L.

Se ha querido comparar las cargas máximas permitidas por las normas EN 378:2016 y ASHRAE 15 para una selección de refrigerantes alternativos en los principales sistemas de refrigeración y climatización (ver Tabla VI). Los objetivos son, por un lado, verificar si existen alternativas viables desde el punto de vista de la legislación y, por otro, encontrar las discrepancias que puedan existir entre las cargas permitidas por ambas normas técnicas.

Tabla VI. Casos de estudio analizados

Sector	Emplazamiento	Sistemas
Refrigeración doméstica	Cocina de 25 m ³	- Frigoríficos y congeladores domésticos
Refrigeración comercial	Pequeño comercio de 150 m ²	- Frigoríficos y congeladores comerciales - Unidades de condensación remota
	Gran superficie comercial	- Unidades de condensación remota - Central frigorífica directa - Central frigorífica en cascada - Central frigorífica indirecta
Refrigeración industrial	Cámara frigorífica	- Sistemas monoblock - Sistemas semicompactos
Climatización	Estancia de 30 m ²	- Equipo portátil de A/C - Equipo partido de A/C
	Pequeño comercio de 150 m ²	- Equipo partido A/C - Sistema Rooftop
	Gran edificio	- Sistema centralizado - Sistema VRF

Los resultados de este análisis se muestran en la Tabla VII.

Se observa que en las aplicaciones de refrigeración – doméstica, comercial e industrial – la tendencia es hacia refrigerantes naturales como los hidrocarburos, el R-744 (CO₂) y el R-717 (amoníaco). De hecho, esta tecnología es prácticamente una realidad hoy en día. Sin embargo, en el sector de la climatización, el R-410A se va a reemplazar principalmente por el R-32, que es un HFC con GWP de 675. Si bien a largo plazo se podría desarrollar la tecnología para utilizar refrigerantes naturales, como los hidrocarburos, en climatización, quizás no sea necesario. Se podría cumplir con los objetivos de la Enmienda de Kigali aun empleando R-32 en climatización si se hace una transición efectiva a los refrigerantes naturales en el resto de los sectores.

Además, siempre es posible emplear HFC regenerados. El gas refrigerante ya no es un bien infinito por lo que algunas empresas, como Daikin, están impulsando planes de economía circular. En lugar de destruir el gas refrigerante una vez termine la vida útil del aparato o instalación, su principio son las 3R: recuperar el refrigerante, regenerarlo y reutilizarlo. El mayor parque de refrigerantes disponibles se encuentra ahora mismo en las propias instalaciones y equipos. Los gases regenerados quedan fuera de los sistemas de cuotas, pues solo se contabiliza la primera vez que se comercializó el gas. Además, son los únicos refrigerantes que pueden emplearse con un GWP mayor de 2500 para el mantenimiento y reparación. En España, el impuesto a los gases fluorados está aminorado en un 50% para estos gases [Daikin, 2020a].

Tabla VII. Tendencias actuales y futuras de los diferentes sectores de la tecnología frigorífica

Sector	Tecnología actual	Tecnología futura
Refrigeración doméstica	<ul style="list-style-type: none"> - Frigoríficos y congeladores con R-134a 	<ul style="list-style-type: none"> - Frigoríficos y congeladores con hidrocarburos, principalmente R-600a. Las cargas no superarán los 150 gramos. Para equipos de gran potencia puede utilizarse R-1234ze(E).
Refrigeración comercial	<ul style="list-style-type: none"> - Frigoríficos y congeladores con R-134a y R-404A - Unidades de condensación remota con R-134a y R-404A - Centrales de expansión directa con R-134a y R-404A 	<ul style="list-style-type: none"> - Frigoríficos y congeladores con hidrocarburos, aunque cargas limitadas a 150 gramos. R-134a permitido en congeladores comerciales en Estados Unidos. - Unidades de condensación remota con R-744 y, solo en Estados Unidos, R-152a - Sistemas de refrigeración en cascada con R-744 en baja. En alta se utilizará a corto plazo R-134a y, más adelante, R-717 o hidrocarburos (en Europa)
Refrigeración industrial	<ul style="list-style-type: none"> - Sistemas monoblock y semicompactos con HFC y R-717 	<ul style="list-style-type: none"> - Sistemas monoblock y semicompactos de R-717
Climatización	<ul style="list-style-type: none"> - Aparatos Split de R-410A - Aparatos portátil de R-410A - Rooftop de R-410A - Sistemas VRF de R-410A - Enfriadoras de R-410A 	<ul style="list-style-type: none"> - Aparatos Split de R-32, los hidrocarburos están limitados a baja potencia. Hay problemas en Estados Unidos con su standard de producto, pero se prevé que se solucione a corto plazo. - Aparatos portátiles de hidrocarburos - Rooftop de R-32 o, en Europa, hidrocarburos - Sistemas VRF con R-32, con limitaciones en Estados Unidos. - Enfriadoras de R-1234ze(E) y R-32 y, en un futuro, R-717. Hay problemas para los hidrocarburos.

Glosario de palabras clave

Refrigeración: área de la tecnología frigorífica que busca mantener un producto o espacio a una temperatura inferior al ambiente que lo rodea.

Climatización: área de la tecnología frigorífica que busca mantener los parámetros ambientales, es decir, temperatura del aire, humedad relativa y calidad, dentro de unos límites de confortabilidad.

Refrigerante frigorígeno: fluido que transfiere calor con su entorno mediante un mecanismo de cambio de fase, es decir, a temperatura y presión constante. Son los refrigerantes a los que se refiere el presente trabajo.

Refrigerante frigorífero: fluido que transfiere calor de forma sensible, es decir, modificando su temperatura. Son las sustancias, principalmente agua y aire, empleadas en circuitos secundarios para transportar el calor desde el sistema frigorífico hasta el medio a enfriar o calentar.

Ozone Depletion Potential (ODP): potencial de agotamiento de ozono (PAO) en español, es una medida del impacto en el ozono estratosférico que tiene una sustancia expresada en kg equivalentes de R-11.

Global Warming Potential (GWP): potencial de calentamiento atmosférico (PCA) en español, es una medida del impacto sobre el calentamiento atmosférico que tiene una sustancia expresada en kg equivalentes de CO₂ a 100 años.

Total Equivalent Warming Impact (TEWD): impacto total equivalente sobre el calentamiento atmosférico es una medida que engloba tanto el impacto directo, debido a las fugas de refrigerante durante la operación y a las pérdidas durante la recuperación del gas al final de su vida útil, como el impacto indirecto, debido a las emisiones de CO₂ para producir la electricidad consumida por el sistema.

CFC: refrigerantes halogenados compuestos por cloro, flúor y carbono. Fueron la primera generación de refrigerantes sintéticos. Los más importantes son el R-11 y el R-12. Son refrigerantes con muy buenas propiedades termodinámicas y no conllevan riesgos para las personas. Sin embargo, el cloro de su composición y su alta estabilidad molecular favorecen que lleguen a altas capas de la atmósfera, destruyendo el ozono estratosférico.

HCFC: refrigerantes halogenados compuestos por cloro, flúor, carbono e hidrógeno. El más importante fue el R-22, aun usado en ciertas partes del mundo. Tienen menos átomos de cloro que los CFC por lo que su impacto sobre la capa de ozono es menor que el de los CFC.

HFC: refrigerantes halogenados compuestos por flúor, carbono e hidrógeno. Son la actual generación de refrigerantes. Uno de los más importantes es el R-134a. Al no tener cloro en su molécula no agotan la capa de ozono. Sin embargo, debido al flúor, los HFCs provocan un efecto de calentamiento atmosférico cientos o miles de veces superior al del CO₂.

HFO: refrigerantes sintéticos orgánicos compuestos por flúor, carbono e hidrógeno. Se diferencia de los HFC en que las moléculas tienen un doble enlace entre dos átomos de carbono. Esto reduce su estabilidad, por lo que su impacto en el calentamiento atmosférico es prácticamente nulo.

Protocolo de Montreal: acuerdo internacional para reducir la producción y consumo de aquellas sustancias que agotan la capa de ozono, entre las que se encuentran los CFC y los HCFC.

Enmienda de Kigali: ampliación del Protocolo de Montreal para reducir la producción y consumo de los refrigerantes HFC con el objetivo de frenar el calentamiento atmosférico.

Significant New Alternatives Policy (SNAP) Program: programa de la Environmental Protection Agency (EPA) de los Estados Unidos que evalúa y regula el uso de aquellos gases, principalmente los que agotan la capa de ozono, que sean peligrosos para el medioambiente o para las personas.

Lower Flammable Limit (LFL): límite inferior de inflamabilidad, mínima concentración de refrigerante que es capaz de propagar una llama en condiciones de temperaturas y presiones normales.

Acute-Toxicity Exposure Limit (ATEL): límite de exposición de toxicidad aguda, máxima concentración de refrigerante recomendada para evitar problemas para las personas asociadas a la toxicidad del gas.

Oxygen Deprivation Limit (ODL): límite de anoxia, concentración de refrigerante que dificulta la respiración por falta de oxígeno en el ambiente.

Refrigerant Concentration Limit (RCL): límite de concentración de refrigerante, concentración máxima de refrigerante que evita que ocurran problemas de toxicidad, inflamabilidad y desplazamiento del oxígeno.

Límite Práctico (LP): concentración empleada en el cálculo simplificado de la cantidad máxima de refrigerante admisible en un espacio habitado, se deriva del RCL o de la carga límite establecida históricamente.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Glosario de palabras clave	xxiv
Índice	xxvi
ÍNDICE DE TABLAS	xxviii
ÍNDICE DE FIGURAS	xxx
1 Introducción	1
1.1 <i>Objetivo</i>	2
1.2 <i>Clasificación de los sistemas frigoríficos</i>	3
1.3 <i>Los sistemas frigoríficos y los refrigerantes más habituales por sector</i>	4
1.3.1 Refrigeración doméstica	4
1.3.2 Refrigeración comercial	4
1.3.3 Refrigeración industrial	5
1.3.4 Refrigeración en transporte	5
1.3.5 Climatización	5
2 Revisión de la problemática de los fluidos refrigerantes	7
2.1 <i>Propiedades de los fluidos refrigerantes</i>	7
2.2 <i>Protocolo de Montreal</i>	8
2.3 <i>Control de los Gases de Efecto Invernadero</i>	11
2.3.1 Unión Europea: el Reglamento 517/2014	14
2.3.2 Estados Unidos: Significant New Alternatives Policy (SNAP) program	18
2.3.3 Canadá	24
2.3.4 Japón	26
2.3.5 Australia	26
2.3.6 China	27
2.3.7 Comparación de las medidas adoptadas por los países estudiados	27
3 Análisis de las normativas internacionales sobre fluidos refrigerantes	31
3.1 <i>Normas sobre clasificación de los refrigerantes</i>	31
3.1.1 Denominación alfanumérica	32
3.1.2 Clasificación de seguridad	33
3.1.3 Cálculo del RCL	34
3.2 <i>Norma EN 378:2016</i>	35
3.2.1 Real Decreto 552/2019	40
3.2.2 La aplicación de la norma EN 378 a otras legislaciones nacionales europeas	42
3.3 <i>Norma ASHRAE 15:2019</i>	44
3.3.1 International Building Code (IBC)	46
3.4 <i>Estándares verticales</i>	46
3.4.1 Refrigeración doméstica	47
3.4.2 Refrigeración comercial	47
3.4.3 Climatización	47

4	Encaje de los nuevos refrigerantes en la normativa internacional	49
4.1	<i>Casos de estudio</i>	50
4.1.1	Refrigeración doméstica	53
4.1.2	Refrigeración comercial en un pequeño comercio	54
4.1.3	Refrigeración comercial en una gran superficie comercial	56
4.1.4	Refrigeración industrial de cámaras frigoríficas	59
4.1.5	Climatización de la estancia de una vivienda	60
4.1.6	Climatización de un pequeño comercio	62
4.1.7	Climatización en un gran edificio	64
5	Conclusiones	67
	Anexo A. Características de los principales refrigerantes	71
	Anexo B. Tablas para el cálculo de la carga máxima permitida según norma EN 378:2016	75
	Referencias	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Calendarios de abandono para los HCFC establecidos en el Protocolo de Montreal tanto para las partes fuera del artículo 5 como para las partes del artículo 5	9
Tabla 2. Calendario de reducción de HFC según la Enmienda de Kigali para las partes fuera del artículo 5	12
Tabla 3. Calendario de reducción de HFC según la Enmienda de Kigali para las partes del artículo 5	12
Tabla 4. Emisión directa total y per cápita de HFC para los principales países	13
Tabla 5. Reglamentos de control de los gases fluorados para los principales territorios	13
Tabla 6. Hoja de ruta de prohibiciones en la UE a HFC según su GWP para determinadas aplicaciones	15
Tabla 7. Ejemplo de tabla de la Regla del 10 de abril de 2015 para equipos de pared	24
Tabla 8. Estimación de la demanda de climatización en función del área acondicionada	24
Tabla 9. Hoja de ruta de prohibiciones en Canadá a HFC según su GWP para determinadas aplicaciones	25
Tabla 10. Hoja de ruta de prohibiciones en Japón a HFC según su GWP para determinadas aplicaciones	26
Tabla 11. Recomendaciones del Gobierno chino para reemplazar los HCFC y HFC [Danfoss, 2018].	27
Tabla 12. Comparación entre las restricciones establecidas en la Unión Europea, los Estados Unidos, Japón y Canadá	29
Tabla 13. Designación de letras en propanos y propenos	32
Tabla 14. Clases de seguridad de los refrigerantes	34
Tabla 15. Comparación entre ATEL, LFL y RCL de los refrigerantes más importantes	34
Tabla 16. Cota superior de la carga máxima por inflamabilidad en emplazamientos de clase I o II en aplicaciones diferentes a la climatización [Rodríguez de Arriba, P.E., 2018].	37
Tabla 17. Comparación de la carga máxima permitida en hidrocarburos para los principales estándares verticales	47
Tabla 18. Casos de estudio analizados	50
Tabla 19. Listado de refrigerantes tradicionales y alternativos clasificados según su aplicación, su clase de seguridad y su GWP	51
Tabla 20. Carga máxima permitida en kg para un sistema de refrigeración doméstica en una cocina de 25 m ³ según las normas EN 378:2016 y el ASHRAE 15	54
Tabla 21. Carga máxima permitida en kg para frigoríficos y congeladores en un pequeño comercio según las normas EN 378:2016 y ASHRAE 15	56
Tabla 22. Carga máxima permitida en kg para unidades de condensación remota en un pequeño comercio según las normas EN 378:2016 y ASHRAE 15	56
Tabla 23. Carga máxima permitida en kg para una unidad de condensación remota en una gran superficie comercial según las normas EN 378:2016 y ASHRAE 15	57
Tabla 24. Carga máxima permitida en kg para una central frigorífica directa en una gran superficie comercial según las normas EN 378:2016 y ASHRAE 15	58

Tabla 25. Carga máxima permitida en kg para una central frigorífica indirecta en una gran superficie comercial según las normas EN 378:2016 y ASHRAE 15	58
Tabla 26. Carga máxima permitida en kg para sistemas monoblock en una cámara frigorífica según las normas EN 378:2016 y ASHRAE 15	59
Tabla 27. Carga máxima permitida en kg para sistemas semicompactos en una cámara frigorífica según las normas EN 378:2016 y ASHRAE 15	59
Tabla 28. Carga máxima permitida en kg para aparatos de A/C partidos en una vivienda según las normas EN 378:2016 y ASHRAE 15	61
Tabla 29. Carga máxima permitida en kg para aparatos de A/C portátiles en una vivienda según las normas EN 378:2016 y ASHRAE 15	61
Tabla 30. Carga máxima permitida en kg para sistemas rooftop de climatización en un pequeño comercio según las normas EN 378:2016 y ASHRAE 15	63
Tabla 31. Carga máxima permitida en kg para sistemas partidos de A/C de climatización en un pequeño comercio según las normas EN 378:2016 y ASHRAE 15	63
Tabla 32. Carga máxima permitida en kg para sistemas compactos horizontales de falso techo de climatización en un pequeño comercio según las normas EN 378:2016 y ASHRAE 15	63
Tabla 33. Carga máxima permitida en kg para una enfriadora de agua en un hospital, un gran edificio residencial y un edificio de oficinas según las normas EN 378:2016 y ASHRAE 15	65
Tabla 34. Carga máxima permitida en kg para un sistema VRF en un hospital, un gran edificio residencial y un edificio de oficinas según las normas EN 378:2016 y ASHRAE 15	65
Tabla 35. Tendencias actuales y futuras de los diferentes sectores de la tecnología frigorífica	69
Tabla 36. Propiedades de los principales refrigerantes	73
Tabla 37. Requisitos de límites de carga para refrigerantes basados en toxicidad [Real Decreto 552/2019]	75
Tabla 38. Requisitos de límite de carga para refrigerantes basados en inflamabilidad [Real Decreto 552/2019]	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fases de la cadena de frío [INTARCON 2020a)]	1
Figura 2. Consumo mundial en toneladas de ODP de HCFC	10
Figura 3. Evolución del consumo de HCFC en toneladas de ODP	10
Figura 4. Comparación del consumo mundial de HCFC con el consumo si restamos las emisiones de China	11
Figura 5. Comparación entre los calendarios de reducción de HFC de la Enmienda de Kigali y el Reglamento 517/2014 de la Unión Europea	14
Figura 6. Evolución de la cantidad relativa que se puede asignar en cada etapa del proceso de asignación de cuotas	16
Figura 7. Evolución de la oferta y la demanda en el mercado de refrigerante desde 2013 hasta 2017 [Intarcon, 2019]	17
Figura 8. Evolución de los precios de refrigerante desde 2017 a 2019 [Intarcon, 2019]	17
Figura 9. Comparación de la carga máxima permitida para un aparato de aire acondicionado Split con R-32 en una vivienda por el procedimiento estándar y el procedimiento alternativo	40
Figura 10. Relación entre el GWP y el RCL para los principales refrigerantes	49
Figura 11. Carga máxima permitida (kg) por la norma EN 378:2016 para R-717 y R-290 en sistemas monoblock y semicompactos para la refrigeración de una cámara frigorífica en función de su volumen	60

1 INTRODUCCIÓN

La tecnología frigorífica es la rama de la ingeniería que emplea equipos destinados a mantener la temperatura de una cámara por debajo de la temperatura que lo rodea. En realidad, se puede ampliar esta definición a cualquier aplicación en la que se quiera conseguir una temperatura inferior o superior a la del ambiente. De esta manera, la tecnología frigorífica se divide en dos grandes campos: la **refrigeración**, que consiste en mantener la temperatura de un producto por debajo de la temperatura del ambiente, y la **climatización**, cuyo objetivo es garantizar el confort térmico.

El sector de la refrigeración podemos dividirlo en cinco campos de aplicación: el **frío doméstico**, el **frío comercial**, el **frío industrial**, la **refrigeración en transporte** y **aplicaciones especiales a muy baja temperatura** (inferiores a -50°C).

Las tecnologías de la climatización se dividen en **sistemas fijos** y en **sistemas móviles**. A su vez, los primeros se clasifican en **centralizados** y **autónomos**.

La importancia de la tecnología frigorífica es incuestionable. Una de sus funciones principales es la de mantener la cadena de frío de los alimentos que consumimos, que son en su gran mayoría perecederos. La cadena de frío significa controlar que la temperatura durante todas sus fases se ha mantenido dentro de unos límites razonables que aseguren la inocuidad del producto. Estas fases (Figura 1) son el acopio de la materia primaria, transporte, almacenamiento, procesamiento, empaquetamiento, distribución, venta y, finalmente, conservación por el cliente antes del consumo. En todas estas etapas interviene la tecnología frigorífica.

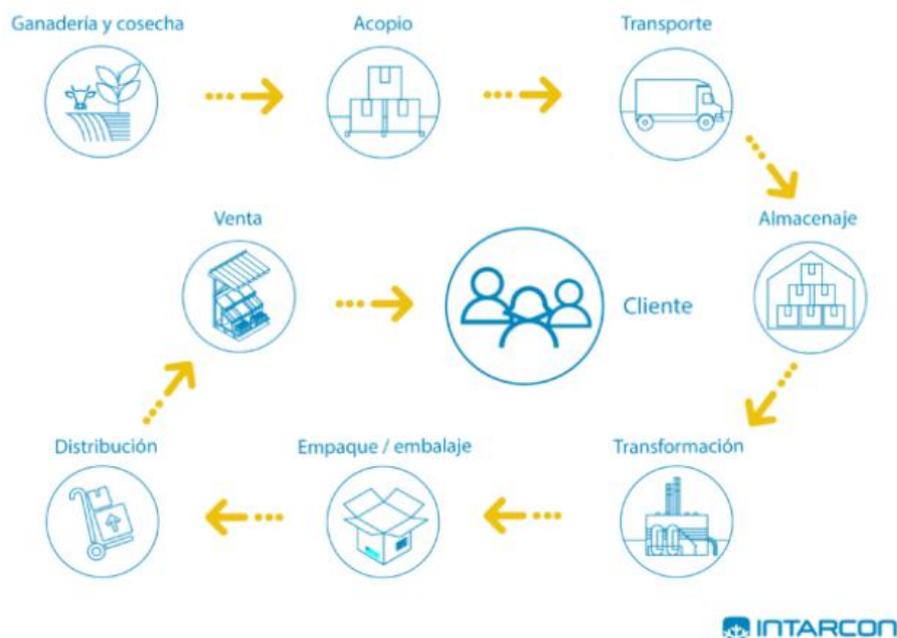


Figura 1. Fases de la cadena de frío [INTARCON 2020a]

La falta de refrigeración ocasiona dos problemas en los alimentos. Por un lado, la aparición de microorganismos que empeoran el aspecto, el sabor o el olor. En segundo lugar, el mecanismo de maduración u oxidación, que provoca la transformación del azúcar. Ambos procesos se acentúan con la cantidad de azúcar y se ralentizan con la refrigeración, llegando incluso a detenerse con la congelación. Cuando hablamos de refrigeración (o temperaturas de frío positivo) nos referimos a mayores de 0°C , generalmente entre $0-8^{\circ}\text{C}$. En cambio, cuando hablamos de frío negativo nos referimos a temperaturas menores de 0°C , principalmente temperaturas por debajo del punto de congelación, entre -18°C y -35°C . Con respecto a la congelación, es conveniente que tenga lugar en el menor tiempo posible para evitar la formación de estructuras que estropeen la textura y también para evitar la ósmosis del azúcar hacia el interior, lo que empeora el sabor. Por el contrario, la descongelación debe ser lo más lenta posible y preferiblemente no a temperatura ambiente, sino cercanas a 4°C para que no proliferen

bacterias [INTARCON, 2020b)].

Mientras el autor escribe esta introducción, España esta sumida en un Estado de Alarma como respuesta a la pandemia mundial del Covid-19. La preservación de los medicamentos es otro de los roles cruciales de la tecnología frigorífica. Los medicamentos se deben almacenar en lugares secos, protegidos de focos de calor y de la luz, y a una determinada temperatura. Esta temperatura depende del medicamento en cuestión. Puede ser entre 20 y 25°C (ambientes controlados), entre 2 y 8°C (refrigeración controlada) o entre -25°C y -15°C (congelación).

Cada ambiente requiere de un equipo de refrigeración diferente. Para ambientes controlados puede ser suficiente con equipos de climatización. Para refrigeración controlada se necesitan sistemas de refrigeración de media temperatura. Para congelación, equipos de baja temperatura. En función de la cantidad almacenada el recinto podrá ser un local industrial, una cámara frigorífica, un armario frigorífico o un mueble frigorífico. A su vez, cada uno de estos recintos emplea equipos constructivamente distintos. En locales industriales se emplean equipos propios de la refrigeración industrial. En cámaras frigoríficas se utilizan equipos semicompactos de refrigeración comercial. En armarios frigoríficos se emplean unidades remotas de condensación, también típicas de locales comerciales. Por último, los muebles frigoríficos suelen incorporar el sistema de refrigeración (sistema compacto) [INTARCON, 2020c)].

La climatización es sin lugar a duda el otro de los grandes sectores de la tecnología frigorífica con un alto reconocimiento. En 2019 este sector facturó más de 1200 millones de euros en nuestro país y enlaza cinco años de continuo crecimiento [caloryfrio, 2020].

1.1 Objetivo

Este Trabajo Fin de Máster es una continuación natural de mi Trabajo Fin de Grado titulado “Fluidos Refrigerantes: Análisis de la Situación Actual” en el que se describía, por un lado, la problemática medioambiental que envuelve a los fluidos refrigerantes y, por otro, se analizaba si el ya derogado Reglamento de Seguridad de las Instalaciones Frigoríficas de 2011 permitía el uso de los llamados refrigerantes alternativos. Se llaman así a los refrigerantes que tienen un bajo impacto medioambiental, aunque desafortunadamente también tengan peores características de toxicidad o inflamabilidad. La conclusión fue que en la mayoría de las principales aplicaciones de refrigeración dicho Reglamento impedía el uso de estos refrigerantes por lo que era una urgencia la aprobación de un nuevo RSIF. Esto acabaría ocurriendo dos años más tarde, en septiembre de 2019, con el Real Decreto 552/2019.

En este capítulo se establecen los objetivos del Trabajo. Además, se definen y clasifican los sistemas frigoríficos según sus usos finales. Se señalan cuales son los refrigerantes más habituales en cada aplicación.

En el capítulo 2 se revisa la problemática medioambiental. Se presentan y detallan las medidas de los principales acuerdos internacionales para proteger la capa de ozono y reducir el calentamiento atmosférico. Se analizan y comparan los Reglamentos de diferentes partes del mundo que establecen vetos a los refrigerantes en función a su impacto medioambiental. Se contextualiza para 2020 los retos tecnológicos a los que la tecnología frigorífica tendrá que hacer frente en esta década debido a dichas restricciones.

En el mencionado Trabajo Fin de Grado tan solo se analizó la normativa comunitaria y nacional que es de aplicación en el territorio español. Se amplía esta visión en el capítulo 3 comentando los principales standards que afectan a la tecnología e instalaciones frigoríficas. Se comparan las dos normas más importantes a nivel mundial sobre seguridad en estas instalaciones. De estas normas emanan todos los Reglamentos de Seguridad del mundo por lo que son representativas del sector. Además, se profundiza en los mínimos de carga que se toleran en diferentes lugares del mundo por sus reglamentos nacionales.

Por último, en el capítulo 4 se indaga acerca de las nuevas tendencias y del futuro de la tecnología frigorífica. Se estudia el encaje que estos sistemas tienen dentro de la normativa previamente considerada, estableciendo unos casos de estudio para comparar las restricciones de carga de refrigerante según cada norma.

En el Anexo A. Características de los principales refrigerantes se incluye una tabla (Tabla 36) con las características más importantes de los refrigerantes mencionados en este TFM.

En el Anexo B. Tablas para el cálculo de la carga máxima permitida según norma EN 378:2016 se muestran las tablas necesarias para calcular la carga máxima según la norma EN 378:2016 según toxicidad (Tabla 37) e inflamabilidad (Tabla 38). Se incluyen a modo ilustrativo, pues toda la casuística que deriva de estas tablas se

analizó en el capítulo 3.

Por todo esto, los objetivos de este Trabajo Fin de Máster son:

- Ampliar la visión de la problemática medioambiental a partir de los Reglamentos existentes en diferentes países que establecen restricciones a los refrigerantes según sus propiedades medioambientales.
- Analizar las posibilidades de los refrigerantes alternativos y las nuevas tecnologías dentro de los principales Reglamentos medioambientales y de Seguridad a nivel internacional.

1.2 Clasificación de los sistemas frigoríficos

Un **sistema frigorífico** se define como un conjunto de dispositivos interconectados que constituyen un circuito frigorífico cerrado y enfrían o calientan un medio externo gracias al cambio de fase de un fluido refrigerante.

Un **sistema semicompacto o partido** es aquel sistema frigorífico construido completamente en fábrica y que no requiere que se monten in situ ningún elemento que contenga refrigerante con excepción de las válvulas de interconexión o pequeños tramos de tuberías. Por ejemplo, los aparatos Split de A/C o los equipos habituales de cámaras frigoríficas.

Un **sistema compacto** es un sistema semicompactos montado y cargado en fábrica que se instala sin conectar ningún elemento que contenga refrigerante. Por ejemplo, los frigoríficos domésticos, una enfriadora de agua o un rooftop.

Un **sistema sellado herméticamente** es aquel equipo compacto en el que todas las piezas que contienen refrigerante están sujetas mediante soldaduras, de tal manera que las fugas sean muy bajas.

Un **sistema móvil** es aquel que se desplaza durante su funcionamiento. Aquí se incluyen los equipos de refrigeración para el transporte y los equipos de aire acondicionado en vehículos. En contraposición, un **sistema fijo** es el que no se desplaza durante su uso. Un **sistema transportable** es un sistema fijo en funcionamiento, pero que es posible desplazarlo de un emplazamiento a otro, por ejemplo, los aparatos portátiles de aire acondicionado.

Un **circuito secundario** es un circuito, abierto o cerrado, que emplea un fluido intermedio, que puede ser refrigerante frigorífero o frigorígeno, para transferir calor con el medio que se quiere enfriar o calentar.

Un **sistema en cascada** es un sistema frigorífico formado por dos circuitos frigoríficos independientes, de tal manera que el evaporador del refrigerante primario es el condensador del refrigerante secundario.

Los sistemas de refrigeración pueden clasificarse en:

1. **Sistemas directos:** el refrigerante y el medio a enfriar o calentar están separados únicamente por un intercambiador de calor, de manera que una fuga de refrigerante puede acabar en el medio. También se incluye los sistemas en los que exista un fluido intermedio que se pulverice en el medio a enfriar o calentar. De esta manera, un sistema de acondicionamiento de aire mediante descarga a través de conducto se considera un sistema directo. En algunos Reglamentos a estos últimos sistemas se les llama **sistemas indirectos abiertos**, pero de forma práctica en cualquier normativa se tratan como sistemas directos puesto que acarrear el mismo riesgo.
2. **Sistemas indirectos:** el refrigerante está confinado en un circuito frigorífico, no existiendo contacto directo entre el refrigerante y el medio.
 - a. **Sistema indirecto cerrado:** existe un fluido secundario en circuito cerrado (p. ej. un sistema centralizado con fan-coil). Se le llama **sistema indirecto cerrado ventilado** si una fuga de refrigerante puede evacuarse fuera del espacio ocupado.
 - b. **Sistema doble indirecto:** el fluido secundario intercambia calor con un tercer fluido que podrá estar en circuito abierto o cerrado. Este sería el caso de un sistema centralizado que contiene el refrigerante en una enfriadora de agua o bomba de calor, utiliza agua como refrigerante secundario y, a su vez, existe una climatizadora en la que esa agua acondiciona el aire que se impulsa a los locales ocupados.

- c. **Sistema indirecto de alta presión:** es un sistema indirecto en el que el circuito secundario se encuentra a una presión mayor que el circuito de refrigerante, de manera que es imposible que una fuga de refrigerante acabe en el local.

Los sistemas indirectos acarrearán menos riesgos que los directos. También tienen menor carga de refrigerante y ventajas desde el punto de vista del marco normativo, lo que abre la puerta al empleo de refrigerantes naturales o de bajo GWP. Otro punto fuerte es que, en aplicaciones comerciales e industriales, posibilita el construir sistemas compactos probados en fábrica, los llamados “Plug and Play”, lo que minimiza el tiempo de instalación y puesta en marcha. Como desventajas, tienen mayor coste de inversión y un coste añadido de operación por el bombeo del circuito secundario y el menor COP del circuito primario al necesitar una menor temperatura de evaporación (o mayor de condensación en bombas de calor) [INTARCON, 2020e].

1.3 Los sistemas frigoríficos y los refrigerantes más habituales por sector

Se van a comentar los sistemas frigoríficos y refrigerantes más empleados para la refrigeración doméstica, la refrigeración comercial, la refrigeración industrial, la refrigeración en transporte, los sistemas de climatización en edificios y los sistemas de climatización de vehículos.

1.3.1 Refrigeración doméstica

En el sector doméstico hablamos de **frigoríficos y congeladores** concebidos para su uso en viviendas, aunque pueden instalarse en otros lugares. Son equipos compactos directos de pequeño tamaño. Emplean compresores herméticos generalmente de desplazamiento positivo o rotativos. La temperatura de almacenamiento oscila entre 2-8°C en frigoríficos y en torno a -18°C para congeladores. La potencia de los compresores oscila entre 75-250 W, siendo el consumo promedio diario inferior al 1 kWh. Históricamente, el refrigerante más empleado en estas aplicaciones era el R-12, que evidentemente fue reemplazado por sus nefastas propiedades medioambientales. Actualmente, el refrigerante predominante es el R-134a (GWP 1430), aunque muchos lugares del mundo, como por ejemplo la Unión Europea, ya está prohibido por su elevado GWP. El refrigerante que está llamado a sustituirlo es el isobutano (R-600a), que es un refrigerante muy inflamable, pero con nula incidencia medioambiental. Una diferencia significativa en congeladores con R-134a es que el R-600a opera a presiones de vacío, pues su temperatura de ebullición a presión atmosférica es de tan solo -12°C.

La carga específica de estos equipos, es decir, la carga de refrigerante necesaria para dar 1 kW de potencia frigorífica puede estimarse en 0.4 kg/kW para los refrigerantes HFC y en 0.15 kg/kW para los hidrocarburos [INTARCON, 2019].

1.3.2 Refrigeración comercial

En el sector comercial encontramos tres tipos de sistemas frigoríficos. Las temperaturas de operación son muy variadas desde 8-15°C para flor cortada, a 4°C para la mayoría de los productos perecederos o temperaturas para mantener los productos congelados de hasta -30°C en el caso de helados.

- **Frigoríficos y congeladores comerciales:** sistemas autónomos compactos directos encontrados en supermercados y pequeños comercios para conservar y exponer los alimentos.
- **Unidades de condensación remota o motocondensadoras** son sistemas de 1-20 kW formadas por el compresor y el condensador que se instalan al aire libre, mientras que el evaporador se encuentra en el interior del local para dar refrigeración a un mueble frigorífico. Se encuentran en supermercados y otros locales como restaurantes para disminuir el calor que los frigoríficos y congeladores disipan al interior.
- **Centrales frigoríficas**, también llamadas instalaciones frigoríficas centralizadas, son aquellas en las que los compresores se encuentran en una sala de máquinas y el condensador al aire libre. Las centrales frigoríficas de expansión directa distribuyen el refrigerante condensado y expandido a los evaporadores repartos por el supermercado en los muebles frigoríficos. En las centrales frigoríficas indirectas todo el circuito frigorífico se encuentra en una sala de máquinas y lo que se distribuye al local es un fluido secundario o un refrigerante de un sistema en cascada. Se encuentran en supermercados de gran superficie.

Los refrigerantes más empleados en refrigeración comercial son el R-404A (GWP 3922), el R-507 (GWP 3985), el R-452A (GWP 2140), el R-407A (2107), el R-442A (GWP 1888) o el R-134a (GWP 1430). Una tendencia en auge de popularidad son las centrales frigoríficas en cascada con R-744 (GWP 1) en el circuito secundario. En el circuito primario puede utilizarse R-744 en ciclo transcrito u otro refrigerante como R-134a y, muy raramente, R-717. Otra alternativa es emplear enfriadoras de glicol de R-717, aunque tampoco es una práctica extendida actualmente.

1.3.3 Refrigeración industrial

En cuanto a la producción de frío en industria lo primero a comentar es que, siempre que la aplicación y las condiciones climáticas del emplazamiento así lo permitan, se emplean torres de condensación para enfriar agua. La gran virtud de estos equipos son los bajos costes de operación, aunque evidentemente son incapaces de producir agua a tan baja temperatura como lo haría un equipo frigorífico. En segundo lugar, para aplicaciones industriales los refrigerantes de media o baja seguridad no suelen encontrar trabas en los reglamentos nacionales en cuanto a límites de carga ya que es más sencillo dar garantías de seguridad a las instalaciones de estos emplazamientos. Son comunes los sistemas indirectos con amoníaco R-717 (GWP 0) en el circuito principal o enfriadoras de líquido de propano R-290 (GWP 3).

Se incluye en el sector de la refrigeración industrial las cámaras frigoríficas. El sistema frigorífico puede ser compacto (**monoblock** de pared, de techo o de puerta) o **semicompacto**. Los compactos son más económicos y sencillos de instalar, pero solo los sistemas semicompactos aseguran que el aire caliente del condensador es expulsado fuera del local. La carga frigorífica de estas cámaras está en torno a 2.5-15 kW por cada 1000 m³ de local. Los refrigerantes empleados para estos sistemas son el R-134a (GWP 1430), el R-404A (GWP 3922), el R-449A (GWP 1397), el R-452A (GWP 2140) y, en equipos compactos, el R-290 (GWP 3). En general, los monoblocks se emplean en cámaras de menor superficie que los semicompactos.

1.3.4 Refrigeración en transporte

La refrigeración en transporte se refiere a vehículos con cámaras refrigeradas que se emplean para trasladar alimentos perecederos u otros productos que necesitan ser conservados a una temperatura inferior al ambiente de manera que se conserve la cadena de frío. Los sistemas empleados en este sector se corresponden con sistemas de refrigeración móviles. Los refrigerantes más empleados son el R-134a (GWP 1430) y el R-404A (GWP 3922).

1.3.5 Climatización

La climatización se define como el conjunto de componentes y equipos cuya función es mantener los parámetros ambientales, es decir, temperatura del aire, humedad relativa y calidad, dentro de unos límites confortables. Los sistemas de climatización fijos son los empleados en edificios, mientras que los móviles son los que se encuentran en vehículos.

En edificios, los sistemas de climatización pueden ser centralizados o autónomos.

En los sistemas centralizados el refrigerante se encuentra contenido en una **enfriadora de agua** o **bomba de calor**, siendo el agua el fluido secundario que proporciona el efecto útil. Son por definición sistemas indirectos. El agua puede distribuirse directamente a los locales para acondicionar el aire mediante fan-coils o inductores. Otra opción es emplear una climatizadora, que es sistema doble indirecto en el que el agua acondiciona el aire que luego se conduce a los locales.

Por el contrario, en los sistemas autónomos el refrigerante acondiciona directamente el aire del local. Destacan los siguientes:

- **Rooftop**: equipos compactos situaciones en el exterior que descargan el aire acondicionado mediante conductos.
- **Equipos portátiles de A/C**: equipos compactos que pueden trasladarse de un lugar a otro.

- **Equipos partidos Split (1x1):** el condensador (en régimen de refrigeración) y el compresor se ubican en el exterior mientras que el evaporador se encuentra en el local. Esta unidad interior puede situarse en la pared, en el suelo, en el techo o en casete.
- **Sistemas VRF** (Variable Refrigerant Flow): nacen de combinar sistemas de múltiples unidades interiores y una única unidad exterior con compresores con inversor de frecuencia. A diferencia de los obsoletos sistemas multisplit, estos solo necesitan dos líneas (tres en caso de querer suministrar frío y calor simultáneamente).
- **Equipos compactos horizontales de falso techo.** Se instalan con todas las partes que contienen refrigerante en el local ocupado.

Los sistemas de climatización en vehículos (**MVAC** en inglés) son los empleados en vehículos para dar confort térmico a los pasajeros. Son sistemas directos.

En las enfriadoras de agua los refrigerantes más empleados son el R-134a (GWP 1430), el R-410A (GWP 2090), el R-407C (GWP 1774) y el R-245fa (GWP 1030). En equipos autónomos los refrigerantes más empleados son el R-134a (GWP 1430), el R-407C (GWP 1774), el R-410A (GWP 2090) y, en los últimos años, el R-32 (GWP 675). En los MVAC el refrigerante más empleado es el R-134a (GWP 1430).

La carga específica en los aparatos partidos y rooftop es de 300 gramos por kW para los HFC convencionales, de 200 gramos por kW para el R-32 y de 100 gramos por kW para el R-290. En el caso de aparatos de equipos compactos se estiman 220 gramos por kW para los HFC convencionales, 150 gramos/kW para el R-32 y 80 gramos/kW para el R-290.

Las mencionadas **bombas de calor** son sistemas para mantener la temperatura de un producto por encima de la temperatura ambiente. No obstante, las bombas de calor empleadas en climatización son invertibles, lo que quiere decir que pueden producir tanto agua caliente (35°C) como fría (7°C). Las bombas de calor también se emplean como sustituto de calderas para producción de ACS (50°C) o, simultáneamente, ACS y agua para calefacción en paneles radiantes o emisores. Por último, existen aplicaciones de alta temperatura (70°C) en la industria.

Como parte de la energía que ceden al ambiente interior está tomada del exterior, se considera que las bombas de calor en régimen de calefacción tienen cierta renovabilidad. Puesto que la normativa exige que gran parte de la producción de ACS proceda de fuentes renovables, las bombas de calor son una alternativa atractiva a las calderas convencionales. No se considera así cuando funcionan en régimen de refrigeración.

2 REVISIÓN DE LA PROBLEMÁTICA DE LOS FLUIDOS REFRIGERANTES

El objetivo de este capítulo es presentar una síntesis revisada de la problemática de los fluidos refrigerantes, actualizada con los cambios que hayan tenido lugar en los últimos años, contextualizada al momento en el que hoy nos encontramos y haciendo énfasis en los retos de la nueva década.

Para lograr estos objetivos se comenzará presentando a los fluidos refrigerantes y definiendo las controvertidas, y en muchas ocasiones contrapuestas, propiedades de seguridad y medioambientales. Se detallarán los dos grandes problemas medioambientales que han asolado el planeta en los últimos cincuenta años, así como la respuesta internacional para atajar sendas crisis. La primera de ellas, el agotamiento de la capa de ozono se resolvió mediante el Protocolo de Montreal. Con respecto a la segunda, el calentamiento atmosférico, se acordó la Enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal, pero es cada país quien debe establecer las medidas concretas para alcanzar los objetivos de dicho acuerdo. En la parte final de este apartado se detallan y comparan las medidas adoptadas por la Unión Europea, los Estados Unidos, Japón, Canadá, Australia y China.

La historia de la refrigeración comenzó hace más de dos siglos, cuando Jacob Perkins patentó por primera vez un ciclo de compresión mecánica simple. Los refrigerantes utilizados hasta 1930 eran sustancias encontradas en la naturaleza como el amoníaco. No obstante, la tecnología de la época no estaba preparada para contrarrestar los riesgos intrínsecos a estos refrigerantes, por lo que fue toda una revolución cuando en 1931 se comercializó el primer refrigerante sintético. Fueron años dorados de la refrigeración que, sin ya problemas de inflamabilidad ni toxicidad, consiguieron alcanzar todos los sectores, incluso el doméstico. Desafortunadamente, a mediados de los 70, F.S. Rowland y Mario Molina postularon su teoría de que el cloro de estos gases sintéticos, los CFC y HCFC, destruía el ozono estratosférico, que es una protección natural a la radiación UV que nos llega del Sol. Esta teoría fue corroborada en 1985 con el descubrimiento del agujero de la capa de ozono.

En 1989 la comunidad internacional aprobó el Protocolo de Montreal para dejar de utilizar los gases que agotan la capa de ozono. En el sector de la refrigeración, los CFC y HCFC fueron sustituidos por los HFC, sin cloro en su composición. Pocos años más tarde, en 1995, el calentamiento atmosférico se convirtió en un problema de máxima actualidad. Finalmente, en 2016 se acordó la Enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal, que propone un abandono progresivo de los HFC debido a su alto potencial de calentamiento atmosférico.

2.1 Propiedades de los fluidos refrigerantes

Los fluidos refrigerantes frigorigenos, de ahora en adelante refrigerantes a secas, son las sustancias de un sistema frigorífico que transfieren calor con el medio, absorbiéndolo a baja presión y temperatura y cediéndolo a alta presión y temperatura, mediante el mecanismo de cambio de fase. Los refrigerantes secundarios o frigoríferos son los que transfieren calor de forma sensible y se emplean para transportar la energía desde el refrigerante primario hasta el medio.

No existe el refrigerante perfecto. A la hora de escoger un refrigerante para un sistema frigorífico hay que tener en cuenta sus propiedades termodinámicas, medioambientales, de seguridad y su coste. Desafortunadamente, no existe un refrigerante, ni siquiera para una aplicación concreta, que presente un equilibrio de estos aspectos claramente superior a los demás. Danfoss (2018) amplía este análisis a un modelo de siete fuerzas. Este modelo propone que el mercado aceptará la solución que equilibre las tres fuerzas económicas (coste de inversión, coste del ciclo de vida y coste asociado a la complejidad de la fabricación) con las cuatro fuerzas culturales (percepción del riesgo, disposición del mercado, desarrollo tecnológico y marco legislativo).

En primer lugar, las características termodinámicas, como la temperatura de evaporación y condensación, nos indican si un refrigerante es apto o no para una determinada aplicación. La temperatura de evaporación está fijada por el foco a enfriar y la temperatura de condensación por el medio disponible para evacuar calor (al revés en una bomba de calor). La presión de evaporación, asociada a la temperatura de evaporación, debe ser superior a la presión atmosférica, pues sino la máquina frigorífica funcionaría en vacío. Para los refrigerantes que

cumplen esto, cuanto mayor sean las presiones de evaporación y condensación más complejo será el diseño mecánico de las válvulas y tuberías. Por otra parte, la capacidad frigorífica, que se define como los m^3/s de refrigerante en el evaporador necesarios para suministrar 1 kW, nos permitirá determinar el caudal de refrigerante necesario para dar la potencia frigorífica. Otras propiedades como la reactividad del refrigerante, la miscibilidad con el aceite lubricante o la conductividad térmica nos detallará las demás características de la instalación.

A continuación, se estudia el coste de los sistemas construidos con cada uno de los refrigerantes que son termodinámicamente aptos. El coste de instalación será el coste de los equipos y elementos, así como el coste del refrigerante. El coste de operación dependerá de la eficiencia del ciclo o EER, que para unas temperaturas determinadas de evaporación y condensación dependen tan solo del refrigerante. El coste del ciclo de vida nos da un criterio de optimización para diseñar las instalaciones frigoríficas. A su vez, comparando el coste de las distintas instalaciones según el refrigerante empleado podemos concluir qué instalación es la económicamente más rentable.

El análisis anterior estaría completo si los refrigerantes no fuesen fluidos potencialmente peligrosos para las personas y para el medioambiental. Tienen, por tanto, unas restricciones normativas según su peligrosidad y su impacto medioambiental que limitan los kg que pueden utilizarse en una instalación o directamente vetan ciertos refrigerantes para algunas aplicaciones concretas. De hecho, estas dos propiedades son probablemente hoy en día las más importantes a la hora de seleccionar un refrigerante.

Con respecto a la seguridad hay que consultar la normativa correspondiente a cada país para ver las restricciones de cada fluido refrigerante. De esto hablaremos en el capítulo 3.

Medioambientalmente, a lo largo de los últimos 50 años el planeta se ha visto amenazado por dos fenómenos medioambientales de los cuales los refrigerantes son en parte responsables: el agotamiento de la capa de ozono y el calentamiento atmosférico.

La capa de ozono es un filtro natural de radiación ultravioleta. Aquellos refrigerantes con cloro en su composición y lo suficientemente estables como para no disociarse antes de llegar a la estratosfera reaccionan con el ozono, destruyéndolo. El indicador que cuantifica este fenómeno es el ODP (Ozone Depletion Potential), que toma como referencia el efecto que produce 1 kg de R-11. La comunidad internacional tomó cartas en el asunto mediante el Protocolo de Montreal en 1989.

En este sentido resulta particularmente interesante clasificar los refrigerantes en naturales y sintéticos. Los primeros, pues existen de manera espontánea en la naturaleza y se extraen de esta para introducirlos en los sistemas frigoríficos, no contribuyen a ninguno de estos fenómenos o lo hacen de manera insignificante. Los segundos, como los CFC, los HCFC, los HFC, las HFO o las mezclas de los anteriores, tienen unos valores de ODP y GWP considerables.

El calentamiento atmosférico consiste en la acumulación en la atmósfera de gases, llamados gases de efecto invernadero entre los que se encuentran los refrigerantes fluorados, que tienen una alta absorción en el espectro infrarrojo que es en el que emite la superficie terrestre. El resultado, llamado efecto invernadero, es un aumento de la temperatura del planeta a fin de mantener el equilibrio térmico entre la radiación que llega del Sol y la emitida por la Tierra. El indicador que lo cuantifica es el GWP (Global Warming Potential), que se mide en kg equivalentes de CO_2 a 100 años. Para paliar este fenómeno la comunidad internacional firmó en 1997 el Protocolo de Kioto y en 2016 la Enmienda de Kigali para ampliar el Protocolo de Montreal.

Como es de esperar, todas estas propiedades están relacionadas. Por ejemplo, las fugas de refrigerante aumentan el impacto medioambiental, el riesgo para las personas y llevan asociados unos costes de recarga. Estas fugas serán menores cuánto mayor sea la inversión en aumentar la estanqueidad y las medidas de seguridad. Otro ejemplo sería el rendimiento energético. Un alto rendimiento energético supone menos coste de operación y menos impacto indirecto debido al consumo de energía eléctrica. Para aumentar la eficiencia de un sistema puede ser necesario utilizar refrigerantes de mayor GWP o en mayores cargas que las mínimas necesarias.

2.2 Protocolo de Montreal

El objetivo de este gran acuerdo internacional era reducir progresivamente hasta su eliminación el uso de diferentes sustancias que provocan el agotamiento de la capa de ozono. Puede consultarse en la página web de la UNEP [UNEP,2019d]. Los datos empleados para las gráficas de este apartado se han obtenido del centro de

datos de la UNEP [UNEP,2019b)].

En este acuerdo se distinguió entre los países más desarrollados, llamados partes fuera del artículo 5, y los países en vías de desarrollo o partes del artículo 5. Entre las partes fuera del artículo 5 se encuentran los miembros de la Unión Europea, los Estados Unidos, Rusia, Japón, Canadá y Australia. Entre las partes del artículo 5 destacan China y los países de Latinoamérica. Para cada grupo de países se establecieron calendarios diferentes de abandono progresivo para cada una de las sustancias consideradas en los diferentes anexos del Protocolo. Así, en el anexo A se encuentran los CFC con un muy alto ODP tales como el R-11 o el R-12, en el anexo B están otros CFC de menor impacto para la capa de ozono como el R-13 y en el anexo C se hallan los HCFC como el R-22 o el R-124, entre otras sustancias que no se emplean como refrigerantes [UNEP,2019a)].

Con respecto a los CFC su abandono ha ocurrido ya en todo el mundo: en 1996 para los países desarrollados y en 2010 para el resto.

Para los HCFC el calendario fue más relajado para que pudiesen ser empleados como refrigerante de transición entre los CFC y la generación sin cloro, los HFC. Actualmente, su abandono se completó en 2020 en los países desarrollados, pero para los países en vías de desarrollo la reducción comenzó en 2015 y no se completará hasta 2030. Se observa en la Figura 2 un crecimiento del consumo de los HCFC a medida que estos refrigerantes se empleaban como sustituto de los CFC hasta el 2000, año en el cual las partes fuera del artículo 5 comienzan a aplicar restricciones para alcanzar el primer objetivo de reducción del 35% en 2004, tal y como se muestra en la Tabla 1. Aun así, se observa como a partir de 2003 comienza a repuntar el consumo de HCFC hasta alcanzar máximos históricos en 2007. La culpa de este crecimiento la tiene China, país considerado en vías de desarrollo cuando se firmó el Protocolo de Montreal, pero que actualmente es una de las principales potencias del planeta. Las reducciones ocurridas hasta 2014 en los países más desarrollados, entre las que se destaca el abandono total de los HCFC en la Unión Europea, quedan amortiguadas por el crecimiento exponencial del consumo en el país asiático. De hecho, no es hasta 2013 que comienzan las restricciones para las partes del artículo 5 que tiene lugar un nuevo descenso, esta vez sí definitivo. Actualmente, con datos de 2018, el consumo mundial de HCFC es el mismo que había en 1994.

En la Figura 3 se muestra el consumo total de HCFC para las partes fuera del artículo 5 y las partes del artículo 5, así como el consumo individual de China. Se observa como el consumo histórico de China -el área bajo la curva- es casi del mismo orden que el consumo de HCFC de los 51 países que conforman el grupo fuera del artículo 5 y más de la mitad del consumo total de las partes del artículo 5, formada por 147 países.

Tabla 1. Calendarios de abandono para los HCFC establecidos en el Protocolo de Montreal tanto para las partes fuera del artículo 5 como para las partes del artículo 5

Anexo C - Grupo I: HCFCs (Consumo)

<i>Partes que no operan al amparo del párrafo 1 del Artículo 5: Consumo</i>		<i>Partes que operan al amparo del párrafo 1 del Artículo 5: Consumo</i>	
Nivel básico:	Consumo de HCFC en 1989 + 2,8% del consumo de CFC en 1989.	Nivel básico:	Promedio 2009–2010
Congelación:	1996.	Congelación:	1 de enero de 2013
Reducción del 35%	1 de enero de 2004.	Reducción del 10%	1 de enero de 2015
Reducción del 75%	1 de enero de 2010.	Reducción del 35%	1 de enero de 2020.
Reducción del 90%	1 de enero de 2015.	Reducción del 67,5%	1 de enero de 2025.
Reducción del 100%	1 de enero de 2020, y en lo sucesivo, consumo restringido al mantenimiento del equipo de refrigeración y aire acondicionado existente en esa fecha.	Reducción del 100%	1 de enero de 2030, y en lo sucesivo, consumo restringido al mantenimiento del equipo de refrigeración y aire acondicionado existente en esa fecha.



Figura 2. Consumo mundial en toneladas de ODP de HCFC

El calendario mostrado en la Tabla 1, proyectado en la Figura 3 para China y el conjunto de las partes del artículo 5, nos muestra que no alcanzaremos niveles de consumo de principios de 1990, es decir, unos 10000 toneladas de ODP, hasta finales de esta década. Esto, en mi opinión, constituye un gran fracaso en el Protocolo de Montreal.

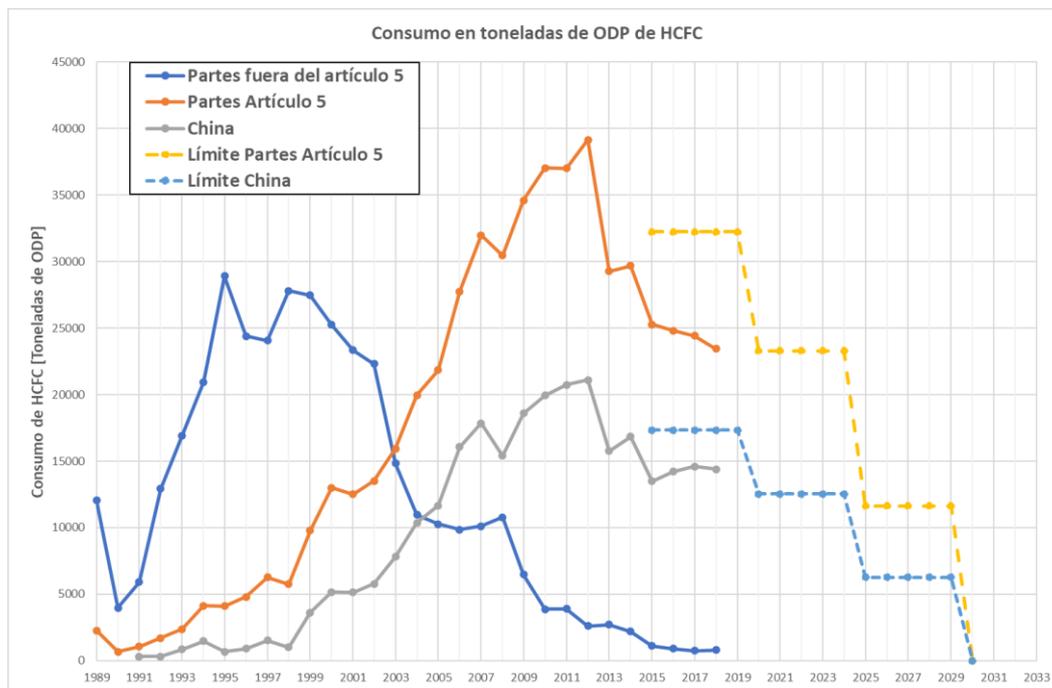


Figura 3. Evolución del consumo de HCFC en toneladas de ODP

En la Figura 4 se puede ver con más detalle el impacto que ha tenido el desarrollo de China en los planes de abandonar los HCFC. Tal y como se comentó anteriormente, los CFC fueron abandonados completamente en las partes fuera del artículo 5 en el año 1996. El calendario de la Tabla 1 muestra como el año de congelación del consumo de HCFC se corresponde con 1996. Esto pone de manifiesto que cuando se fraguó el Protocolo de Montreal el objetivo era que el máximo histórico de emisiones de gases que agotasen la capa de ozono fuese en 1996. La diferencia entre las dos curvas de la Figura 4 no es otra cosa que el consumo de HCFC de China. Se ilustra perfectamente como China creció muy bruscamente a partir de 1997-1998. Hay que recordar que China es un país más de los 147 que conforman el grupo del artículo 5. De no haber ocurrido este crecimiento tan

inesperado, el máximo histórico habría sido en 1996 en lugar de en 2007. Los niveles de emisiones hoy día serían 15000 toneladas de ODP inferior, equivalentes a los del año 1991.

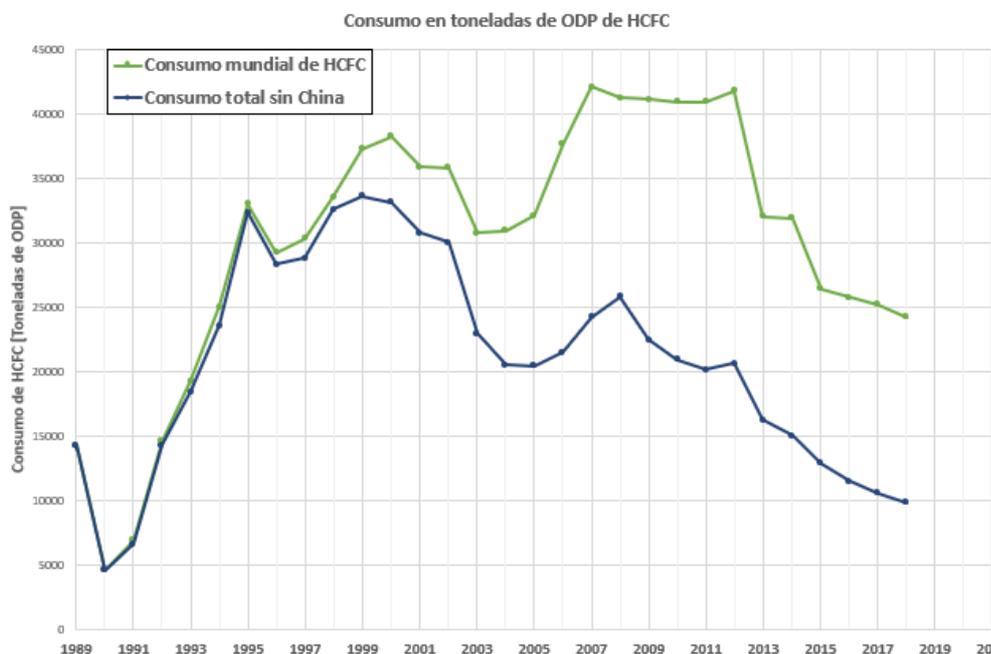


Figura 4. Comparación del consumo mundial de HCFC con el consumo si restamos las emisiones de China

2.3 Control de los Gases de Efecto Invernadero

El Protocolo de Kioto de 1997 fue un acuerdo internacional que expresa la voluntad de los países firmantes de reducir las emisiones de los gases recogidos en el Anexo A del documento, que son el dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, HFCs, perfluorocarbonos y hexafluoruros de azufre.

En 2016, se aprobó la Enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal, lo que supuso el primer compromiso mundial para reducir las emisiones de HFCs, lo que hasta entonces solo había ocurrido en la Unión Europea mediante el Reglamento 517/2014. Se creó un anexo en el Protocolo de Montreal, el anexo F, para los hidrofluorocarbonos (HFC) [UNEP,2019c].

Se establecen cuatro calendarios de reducción. En la Tabla 2 se muestran los calendarios de reducción para las partes fuera del artículo 5, con la excepción de Rusia, Kazajstán, Tayikistán y Uzbekistán que tienen un calendario ligeramente diferente hasta 2029. Para estos países el cálculo del nivel básico sobre el que aplicar las reducciones se determina como el promedio del consumo de HFC que tuvo lugar entre 2011 y 2013 más un cierto porcentaje del nivel básico de HCFC, que para las partes fuera del artículo 5 corresponde al consumo de HCFC del año 1989 más el 2.8% del consumo de CFC en 1989. En 2020 estos países ya han debido hacer efectiva una reducción del 10%.

En la Tabla 3 se encuentran los dos calendarios de reducción para las partes del artículo 5. Al grupo 1 pertenecen la mayoría de los 147 países que conforman esta parte con la excepción de los que forman el grupo 2 que son Arabia Saudita, Bahréin, los Emiratos Árabes Unidos, la India, el Iraq, Kuwait, Omán, el Pakistán, Qatar y la República Islámica del Irán. Para estos el calendario de reducción es más tardío, siendo el primer hito en 2028. Para el cálculo del nivel básico hay que tener en cuenta que, para las partes del artículo 5, el nivel base de HCFC es el promedio de su consumo en los años 2009 y 2010.

Es difícil encontrar datos actualizados de las emisiones de HFC por países. Si nos fijamos en datos de 2010 son los Estados Unidos la región del mundo que más HFC consume con 300 896 kton de CO₂, seguido de China con 183 870 kton CO₂. En tercer lugar, estaría la Unión Europea con 108 193 kton CO₂. El cuarto puesto es para Japón con 60 318 kton CO₂. A continuación, tenemos a Rusia y Canadá con 26 909 y 21 577 kton CO₂, respectivamente. Muy por debajo estaban la India con 13 425 kton CO₂, México con 8 485 kton CO₂ o Australia con 7 992 kton CO₂ [The World Bank, 2019].

Tabla 2. Calendario de reducción de HFC según la Enmienda de Kigali para las partes fuera del artículo 5

Partes fuera del artículo 5 excepto Rusia, Kazajstán, Tayikistán y Uzbekistán		Rusia, Kazajstán, Tayikistán y Uzbekistán	
Nivel básico	Media de HFC para 2011-2013 + 15% del nivel básico de HCFC	Nivel básico	Media de HFC para 2011-2013 + 25% del nivel básico de HCFC
Congelación	-	Congelación	-
Reducción del 10%	1 de enero 2019	Reducción del 5%	1 de enero 2020
Reducción del 40%	1 de enero 2024	Reducción del 35%	1 de enero 2025
Reducción del 70%	1 de enero 2029	Reducción del 70%	1 de enero 2029
Reducción del 80%	1 de enero 2034	Reducción del 80%	1 de enero 2034
Reducción del 85%	1 de enero 2036	Reducción del 85%	1 de enero 2036

Tabla 3. Calendario de reducción de HFC según la Enmienda de Kigali para las partes del artículo 5

Partes del artículo 5 - Grupo 1		Partes del artículo 5 - Grupo 2	
Nivel básico	Media de HFC para 2020-2022 + 65% nivel básico de HCFC	Nivel básico	Media de HFC para 2024-2026 + 65% nivel básico de HCFC
Congelación	1 de enero 2024	Congelación	1 de enero 2028
Reducción del 10%	1 de enero 2029	Reducción del 10%	1 de enero 2028
Reducción del 30%	1 de enero 2035	Reducción del 20%	1 de enero 2037
Reducción del 50%	1 de enero 2040	Reducción del 30%	1 de enero 2042
Reducción del 80%	1 de enero 2045	Reducción del 85%	1 de enero 2047

En el centro de datos de la UNEP encontramos poca información, aunque suficiente para reafirmar los órdenes de magnitud anteriores. Por ejemplo, podemos consultar el nivel básico de seis partes: 184 220 kton CO₂ para la Unión Europea, 71 521 kton CO₂ para Japón, 18 035 kton CO₂ para Canadá y 10 813 kton CO₂ para Australia, lo que está en consonancia con los valores anteriores [UNEP, 2019b].

Por último, Green Cooling Initiative (2020) realiza una estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero de cada país procedente de los sectores de refrigeración y climatización (ver Tabla 4). Según esta fuente es China el principal emisor de GFEI con 351 Mton CO₂. En segundo lugar y tercer lugar están la Unión Europea con 142 Mton CO₂ -incluyendo los 18.1 Mton de Reino Unido- y los Estados Unidos con 131 Mton CO₂, es decir, más de la mitad que China. Japón estaría en cuarto lugar con 51 Mton de CO₂. El quinto puesto sería para Rusia con 45 Mton CO₂. A nivel mundial, se emiten 1140 Mton de CO₂ por lo que las cinco regiones anteriores suponen el 63% de las emisiones totales.

Esta web también muestra datos de emisiones per cápita. En esta estadística el liderato lo tiene Australia con 409 kg per cápita. Le siguen muy de cerca Japón con 403 kg per cápita, Estados Unidos con 399 kg per cápita y

Canadá con 383 kg per cápita. Los países de la Unión Europea emiten 318 kg por habitante, cifra que coincide con las emisiones per cápita de Rusia. A pesar de ser el principal emisor mundial, China tan solo es responsable de 249 kg por habitante.

Tabla 4. Emisión directa total y per cápita de HFC para los principales países

País	Emisión directa (Mton CO ₂)	Emisión directa (kg CO ₂ per cápita)
China	351	249
Unión Europea	142	318
Estados Unidos	131	399
Japón	51	403
Rusia	45	318
Canadá	13.9	383
Australia	9.9	409

Podemos concluir que los mayores consumidores de HFC a nivel mundial son China, los Estados Unidos y la Unión Europea, con mucha diferencia con respecto a los siguientes. De estos tres, China no tiene que congelar su consumo de HFC hasta 2024, por lo que no se espera que tome aún ninguna medida. Por su parte, Estados Unidos, como se verá más adelante, ni siquiera ha ratificado la Enmienda de Kigali. Japón y Rusia ocupan los dos siguientes puestos. A partir de aquí existen varios países que ostentan el sexto puesto, todos ellos rondando los 20 000 kton de CO₂ equivalentes.

La Enmienda de Kigali establece unos compromisos de reducción de HFC, pero no la manera de alcanzar esos objetivos. Es responsabilidad de cada parte la de configurar unas estrategias que le permitan reducir el consumo de HFC en su territorio. A este proceso se le conoce como ratificación de la Enmienda. En los siguientes subapartados se van a comentar las estrategias de abandono de los HFC que están implementándose en la Unión Europea, los Estados Unidos, Japón, Canadá, Australia y China (ver Tabla 5). No se han encontrado planes para Rusia.

Tabla 5. Reglamentos de control de los gases fluorados para los principales territorios

País	Reglamento
Unión Europea	Reglamento 517/2014, también conocido como Reglamento F-Gas
Estados Unidos	Programa SNAP
Canadá	(Regulations Amending the) Ozone-depleting Substances and Halocarbon Alternatives Regulations
Japón	Act on Rational Use and Proper Management of Fluorocarbons
Australia	Ozone Protection and Synthetic Greenhouse Gas Management Act
China	Recomendaciones del Gobierno por sectores a corto y largo plazo

Antes de pasar al siguiente apartado es obligatorio reflexionar sobre la importancia que realmente tienen los

refrigerantes y los sistemas de refrigeración en el calentamiento atmosférico. Los datos anteriores se refieren a las llamadas emisiones directas, que son debidas a fugas de refrigerante durante la operación del sistema y a las pérdidas en la recuperación del gas refrigerante al final de la vida útil del aparato. Sin embargo, también existe una contribución indirecta debida a las emisiones de CO₂ aparejadas a la producción de la energía eléctrica consumida por el equipo. Según Green Cooling Initiative (2020), las emisiones indirectas superan por mucho a las directas. Del total emitido de 3830 Mton de CO₂ a nivel mundial, el 70.3% son emisiones del tipo indirecto mientras que tan solo el 29.7% son emisiones directas. Para reducir las emisiones indirectas la única respuesta es mejorar la eficiencia energética de las instalaciones frigoríficas y apostar por las energías renovables para reducir el factor de emisión de la red eléctrica.

2.3.1 Unión Europea: el Reglamento 517/2014

La Unión Europea, al igual que adelantó el abandono de los HCFC para 2010 en lugar de 2020 como establecía el Protocolo de Montreal, también estableció con anticipación un calendario de reducciones para los HFC mediante este Reglamento, apodado Reglamento F-Gas, y que consistía en un endurecimiento del Reglamento 842/2006 sobre los gases fluorados de efecto invernadero.

Tal y como se observa en la Figura 5 el calendario de reducción según el Reglamento 517/2014 es más estricto que el que corresponde a los países de la Unión Europea según la Enmienda de Kigali, excepto a partir del año 2034 que es del 20% en lugar de un 21% y finalmente en 2036 habrá que reducir hasta un 15%.

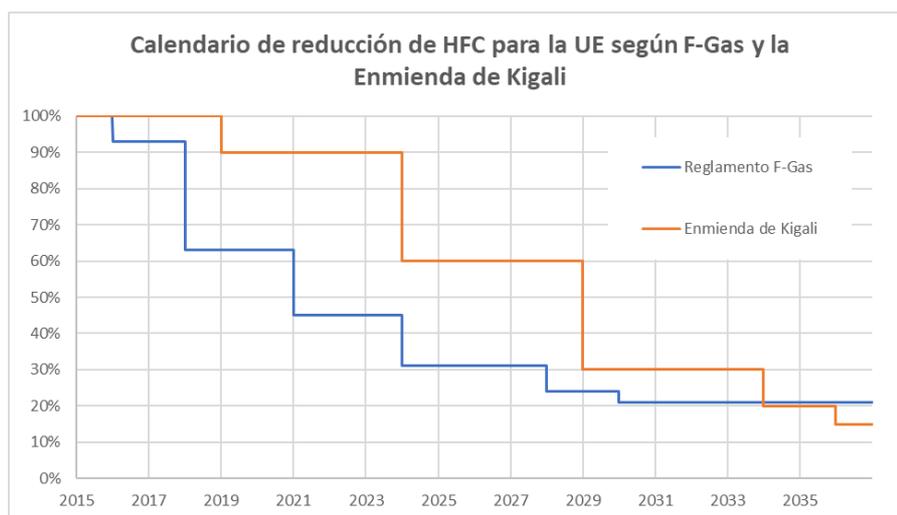


Figura 5. Comparación entre los calendarios de reducción de HFC de la Enmienda de Kigali y el Reglamento 517/2014 de la Unión Europea

2.3.1.1 Calendario de reducción y hoja de ruta de prohibiciones

La primera gran iniciativa de la UE en el Reglamento 517/2014 fue la de establecer una hoja de ruta de prohibiciones a los HFC según su GWP para ciertas aplicaciones (Tabla 6). A fecha de hoy, ya están vetados los refrigerantes con GWP mayor de 150, como el R-134a, para frigoríficos y congeladores domésticos. Desde el 1 de enero de 2020 los refrigerantes con GWP mayor de 2500, como el R-404A y el R-507, no pueden utilizarse para frigoríficos y congeladores comerciales ni en ningún otro aparato fijo de refrigeración (excepto aquellas de muy baja temperatura), lo que supone fuertes restricciones en la refrigeración de cámaras frigoríficas y en las centrales frigoríficas comerciales. Tampoco pueden utilizarse los refrigerantes más habituales en climatización como el R-134a, el R-407C o el R-410A en aparatos portátiles de aire acondicionado por estar el GWP limitado a 150.

En lo que resta de década veremos como desde 2022 el GWP se limitará para aplicaciones de frío comercial todavía más hasta 150, lo que vetará a otros refrigerantes muy utilizados como el R-407C o el R-442A en frigoríficos y congeladores comerciales, y al R-404A junto a los dos anteriores para centrales frigoríficas comerciales. Se libran de esta última restricción los circuitos primarios de sistemas en cascada para los cuales la

limitación de GWP será de 1500 y, actualmente, los refrigerantes más empleados son el R-134a y el R-32. Por último, en 2025 se limitará el GWP a 750 en los Splits de climatización con carga inferior a 3 kg.

En los A/C de los vehículos el GWP está limitado a 150 en vehículos nuevos desde 2017 por la directiva 2006/40/EC.

Tabla 6. Hoja de ruta de prohibiciones en la UE a HFC según su GWP para determinadas aplicaciones

FECHA	PROHIBICIÓN
1 de enero de 2015	Frigoríficos y congeladores domésticos que contienen HFC con un GWP igual o superior a 150
1 de enero de 2020	Frigoríficos y congeladores para uso comercial (aparatos sellados herméticamente) que contienen HFC con un GWP 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 GWP 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 GWP igual o superior a 150
1 de enero de 2022	Frigoríficos y congeladores para uso comercial (aparatos sellados herméticamente) que contienen HFC con un GWP 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 GWP 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 GWP 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 GWP igual o superior a 750

2.3.1.2 Sistema de cuotas en la UE e impuestos al GWP

Para conseguir los objetivos de reducción de la cantidad de HFC comercializables en la UE, se creó un sistema europeo de cuotas que se repartirán entre los productores y los importadores. Estas cuotas representan la cantidad de HFC, en toneladas equivalentes de CO₂, que esa empresa puede comercializar, es decir, la cantidad de HFC que pueden ser importados a la UE o producidos dentro de ella.

Las cuotas se asignan anualmente y de manera gratuita mediante un mecanismo descrito en el Reglamento 517/2014. Este procedimiento se divide en dos etapas. En la primera se reparten las cuotas de las “empresas establecidas” que son aquellas que hayan comercializado HFC con anterioridad y que, por tanto, están inscritas en el registro creado para el seguimiento de este proceso por la Comisión Europea. En la segunda etapa se reparte una reserva entre las empresas que por primera vez quieran comercializar HFC y, desde 2018, las empresas de la etapa anterior que quieran una ampliación de cuota. Por tanto, este método da prioridad a las empresas establecidas frente a las nuevas.

Se permite transferir las cuotas, total o parcialmente, a otro productor o importador con la única condición de que la cuota no proceda de la reserva, es decir, de la etapa 2. De hecho, las empresas importadoras de aparatos cargados que introduzcan en la UE equipos que contengan HFC como aires acondicionados, bombas de calor o

aparatos de refrigeración necesitan que una empresa comercializadora de HFC les ceda parte de su cuota puesto que estas empresas importadoras no entran en el procedimiento de asignación.

Evidentemente, el valor máximo de toneladas equivalentes de CO₂ a repartir en las cuotas disminuye gradualmente según el calendario mostrado en la Figura 5. Se consigue así transferir los compromisos de reducción a los importadores de gases.

Tal y como está establecido el sistema de asignación, la cuantía correspondiente a las reservas fue de un 11% cuando se hizo el reparto por primera vez, pero va a aumentar su peso relativo a lo largo de los años. Una estimación de esto se proyecta en la Figura 6, para cuya realización se ha supuesto que las empresas van a consumir la totalidad de las cuotas disponibles. Esto quiere decir que con el paso de los años las empresas nuevas del sector tendrán las mismas o más oportunidades que las ya establecidas.

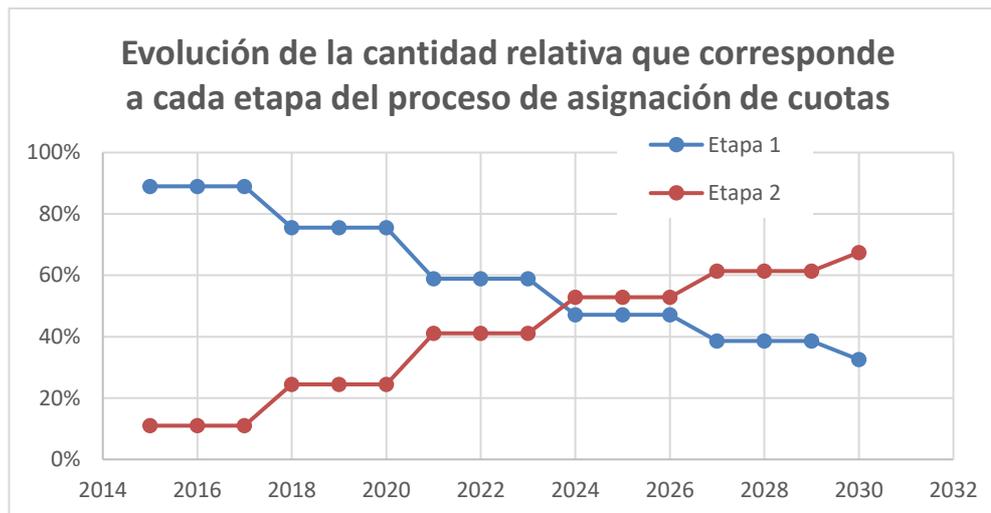


Figura 6. Evolución de la cantidad relativa que se puede asignar en cada etapa del proceso de asignación de cuotas

Otra medida que se tomó en diferentes países de la UE para desalentar el uso de refrigerantes con alto GWP fue el crear un impuesto proporcional al GWP del gas. En España se creó mediante la ley 16/2013 un impuesto a los gases fluorados de efecto invernadero que grava los kg de refrigerante que se adquieran para su reventa o consumo. El tipo impositivo era originalmente de 0.020 €/kg equivalentes de CO₂, pero fue modificado por la ley de presupuestos generales de 2018 pasando a 0.015 €/kg equivalentes de CO₂. Se calcula, por tanto, multiplicando el GWP del refrigerante por la tasa anterior con un máximo de 100 €/kg de refrigerante y estando exentos los refrigerantes con GWP inferior a 150. Para los refrigerantes regenerados el impuesto se reduce en un 50%.

En Noruega también existe un impuesto a los HFC con un tipo impositivo de 0.554 NOK/kg CO₂, lo que equivalen a 0.049 €/kg equivalente de CO₂ [The Norwegian Tax Administration]. En Dinamarca cada HFC tiene una tasa diferente, aunque puede estimarse un ratio entre 0.01-0.015 €/kg equivalente de CO₂ [Skatteministeriet, 2018].

En Francia entrará en vigor este impuesto a partir de 2021, con un tipo impositivo de 0.015 €/kg equivalente de CO₂ que se irá incrementando a 0.018 €/kg en 2022, 0.022 €/kg en 2023, 0.026 €/kg en 2024 y 0.030 €/kg en 2025 [Ammonia21, 2019].

Tal y como señala Intarcon (2019) tanto el impuesto sobre los gases fluorados como el sistema de cuotas del Reglamento F-Gas alteraron el mercado del refrigerante, disparando el precio de la oferta y creando una burbuja de especulación.

En la Figura 7 se muestra como han cambiado las curvas de oferta y demanda del mercado de refrigerante en España desde 2013 hasta 2018. El menor precio, medido en € por tonelada equivalente de CO₂, corresponde a 2013. A partir de 2015 el precio creció debido a la entrada en vigor del impuesto a los gases fluorados. Sin embargo, la ruptura entre oferta y demanda se debió al sistema de cuotas y al comienzo de las reducciones en la cantidad máxima que pueden comercializarse en la UE. A lo largo de 2017 se dispararon los precios por la especulación de los poseedores de cuotas ante la inminente reducción al 63% que ocurriría al año siguiente.

Desde el 1 de enero de 2017 los aparatos que contengan gases fluorados de efecto invernadero no pueden ser comercializados en la UE sin que sus gases estén computados en el sistema de cuotas. Para ello las empresas comercializadoras de equipos deben ser autorizadas por alguna empresa con cuota para usar parte de su cupo. Mediante esa autorización se entiende que la empresa con cuota ha hecho uso de esa cantidad de HFC, pero la empresa que comercialice los equipos cargados no tiene obligación de comercializar los aparatos ese año, pudiendo guardar la autorización para periodos posteriores. De esta manera, la tendencia a lo largo de 2017 fue la de adquirir autorizaciones, pero no hacer uso de ellas, para poder hacer frente a la reducción del 63% de 2018. Por tanto, no es previsible que los precios se disparasen nuevamente durante 2018.

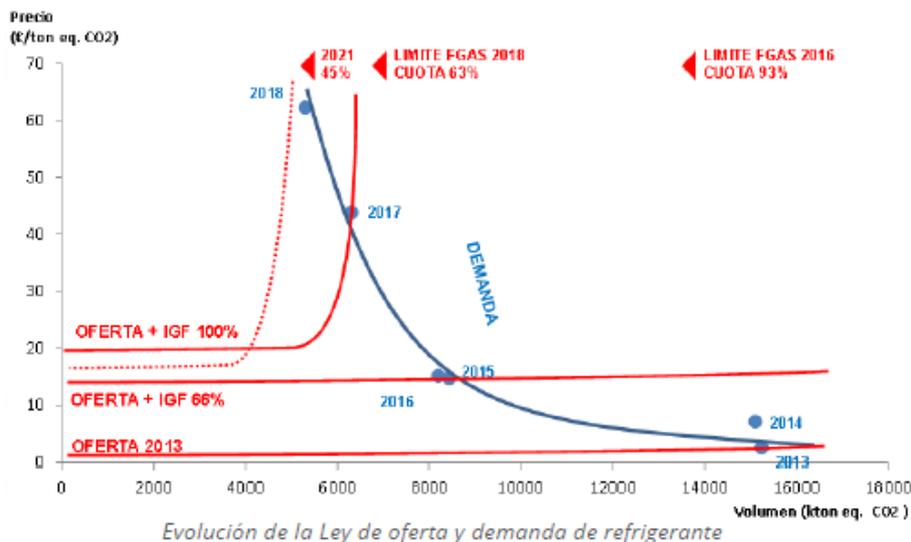


Figura 7. Evolución de la oferta y la demanda en el mercado de refrigerante desde 2013 hasta 2017 [Intarcon, 2019]

Como el sistema de cuotas se establece en función de los kg equivalentes de CO₂ es de esperar que el incremento en los precios de los refrigerantes sea proporcional al GWP del mismo. Efectivamente, tal y como se observa en la Figura 8 el refrigerante que mayor incremento su coste, hasta siete veces, fue el R-404A (GWP 3260). Se observa que los precios alcanzaron un máximo en 2018 y desde entonces han descendido ligeramente. Este descenso se debe a dos motivos. El primero es que los fabricantes han desarrollado nueva tecnología libre de HFC, con menores cargas e índices de fugas. El segundo motivo son los vetos de la Tabla 6 del Reglamento 517/2014: refrigerantes como el R-404A no podrán utilizarse en muchas aplicaciones a partir de 2020, lo que hace caer la demanda de este refrigerante.

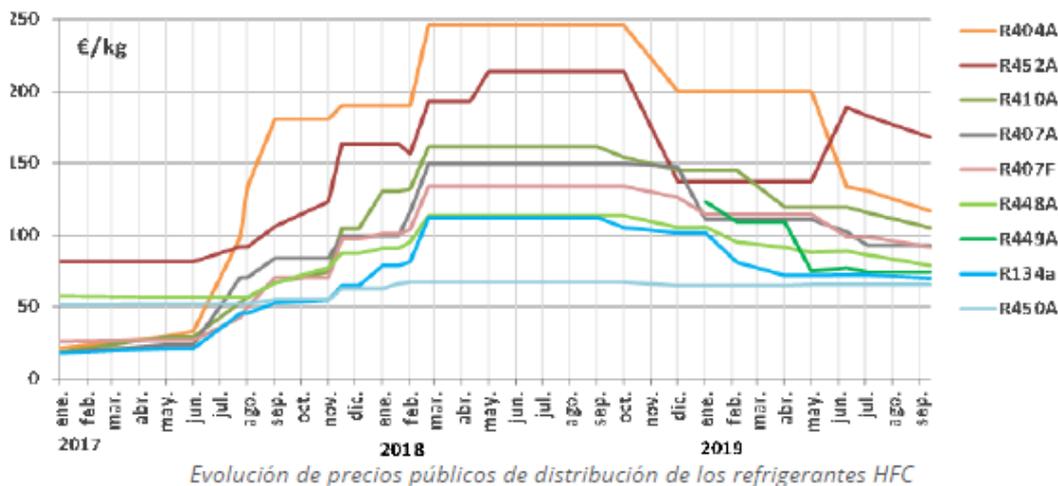


Figura 8. Evolución de los precios de refrigerante desde 2017 a 2019 [Intarcon, 2019]

El F-Gas Consultation Forum es una reunión que se celebra bianualmente para analizar las consecuencias del Reglamento 517/2014 sobre el mercado del refrigerante y el sector de la refrigeración, así como el estado de desarrollo de tecnologías alternativas. Se ha analizado la edición de 2018 gracias a un informe elaborado por Intarcon (2018).

A principios de 2018 el precio promedio de la tonelada equivalente de CO₂ en la UE fue de 20 €, pero las tendencias muestran que, a medida que disminuya la cuota disponible, el precio se acercará a 50 € / tonelada equivalente de CO₂. Esta tendencia no es, desde la óptica de la Comisión Europea, una ineficiencia de su sistema de cuota sino un hecho intencionado y deseable para estimular a todos los interesados a desarrollar tecnologías de bajo GWP.

La última reunión del F-Gas Consultation Forum estaba prevista para marzo de 2020. Finalmente, la pandemia global del Covid-19 obligó a cancelarla.

2.3.2 Estados Unidos: Significant New Alternatives Policy (SNAP) program

Los fluidos refrigerantes están regulados en los Estados Unidos por el Título 40 Parte 82 del Código de Regulaciones Federales (CFR, Code of Federal Regulations), titulado “Protección del ozono estratosférico” [Cornell Law School, 1992]. Este texto está subdividido en 9 apartados:

- Apartado A. Control de la producción y el consumo. En este apartado se implementan las exigencias del Protocolo de Montreal en cuanto a los calendarios de reducción de las distintas sustancias reguladas, entre las que se encuentran los CFC (clase I) y los HCFC (clase II). No incluye la Enmienda de Kigali relativa a los HFC.
- Apartado B. Motor Vehicle Air Conditioning (MVAC).
- Apartado C. Vetos a productos no esenciales que contengan sustancias de Clase I o Clase II, o que se fabriquen con sustancias Clase II.
- Apartado D. Contratación federal.
- Apartado E. Etiquetado de productos que usen sustancias que agoten la capa de ozono.
- Apartado F. Reciclaje y reducción de emisiones.
- Apartado G. Programa de la Política de Nuevas Alternativas Significativas (SNAP, Significant New Alternatives Policy).
- Apartado H. Reducción de emisiones de halones.
- Apartado I. Vetos en aplicaciones de refrigeración y aire acondicionado que utilicen HCFC, por el que quedan prohibidos desde el 1 de enero de 2010 los equipos precargados para refrigeración o aire acondicionado que contengan R-22, R-142b o alguna mezcla de estos.

La máxima autoridad en materia medioambiental en EE. UU. es la EPA (Environmental Protection Agency). Mediante la Clean Air Act, aprobada en el Título 42 Capítulo 85 del United States Code en 1990, este organismo es el responsable de mejorar la calidad del aire y de proteger la capa de ozono. De hecho, el Título 40 Parte 82 del CFR transpone en sus apartados las distintas secciones de la Clean Air Act redactadas por la EPA [EPA, 2017a)]. Se pone así de manifiesto que el United States Codes es la codificación más general de los Estados Unidos, mientras que el CFR contiene leyes específicas que desarrollan y clarifican las del United States Codes. Las leyes del CFR son elaboradas por las diferentes agencias, como el Department of Energy o la EPA.

La Clean Air Act nació para combatir la destrucción de la capa de ozono, habiendo cumplido a fecha de 2020 sus objetivos pues EE. UU. ya no consume CFC ni HCFC. Como se ha comentado en el apartado anterior, el Protocolo de Montreal se amplió con la Enmienda de Kigali para regular las sustancias que provocan el calentamiento atmosférico. A pesar de que dicho acuerdo fue liderado por la administración de Barak Obama, la actual administración de Donald Trump aun no ha ratificado la Enmienda, cuyas primeras restricciones entraron en vigor en enero de 2019.

El 30 de octubre de 2019, se presentó la propuesta de ley titulada “American Innovation and Manufacturing Act”, que establece un calendario de reducción progresiva de los HFC idéntico, aunque comenzando en 2020 en lugar de 2019, al acordado en Kigali [CONGRESS.GOV, 2019].

Aunque dicha propuesta de ley impulsada por los republicanos aun no ha sido aprobada, sí existe un mecanismo por el que los HFC están siendo regulados en los EE. UU: el programa SNAP.

La SNAP [EPA, 2017b)], aprobada en el apartado G del título 40 parte 82 del CFR, se encuentra recogida en la sección 612 del Clean Air Act. Dicha sección insta a la EPA a desarrollar un programa de evaluación de alternativas para las sustancias que agotan la capa de ozono. Concretamente, la SNAP afecta a aquellas aplicaciones donde históricamente se hayan empleado estos fluidos. Estos sectores son ocho:

1. Fabricación de espumas
2. Disolventes para limpieza
3. Aerosoles
4. Equipos de extinción de incendios
5. Esterilizantes
6. Fabricación de tabaco
7. Fabricación de adhesivos, revestimientos y tintas
8. Refrigeración y aire acondicionado

La SNAP es fundamentalmente una lista, aunque dinámica, que evalúa las diferentes sustancias que se emplean y se han empleado en cada una de las aplicaciones analizadas. Su objetivo es discernir cuáles son las mejores alternativas disponibles para cada aplicación concreta atendiendo a criterios de seguridad y de protección del medio ambiente.

Cada sustancia puede ser clasificada en una de las siguientes cuatro categorías:

- Aceptable: la alternativa reduce los riesgos medioambientales y de seguridad, por lo que puede usarse sin restricciones desde el punto de vista de la SNAP.
- Aceptable sujeto a condiciones de uso: la alternativa es aceptable solo si se cumplen ciertos requisitos como medidas especiales de seguridad o limitación de carga.
- Aceptable para usos muy acotados: la alternativa es aceptable, pero solo para una aplicación muy concreta, principalmente porque no existen otras alternativas viables.
- Inaceptable: existen alternativas disponibles que no conllevan tantos riesgos para la salud humano o para el medio ambiente, por lo que no podrán emplearse a partir de una cierta fecha.

De forma práctica, las categorías “aceptable sujeto a condiciones de uso” y “aceptable para usos muy acotados” se consideran una sola, “aceptable con restricciones de uso”.

Cuando se diseña un equipo o proceso que vaya a ser usado en alguno de los ocho sectores anteriores y emplea una sustancia que nunca se había utilizado para esa aplicación, se debe enviar a la EPA la información de seguridad sobre dicho fluido. Esto se debe hacer con una antelación mínima de 90 días con respecto a la comercialización del dispositivo. En esos 90 días de revisión, la EPA tomará la decisión sobre si el fluido puede utilizarse o no, con o sin restricciones. De esta manera, son los avances tecnológicos los que modifican la ley y no al revés como ocurren en muchos otros lugares del mundo. Aun así, la EPA tiene autoridad para modificar las clasificaciones cuando lo considere oportuno, generalmente cuando sale a la luz nueva información científica que no estuvo disponible, pero hubiese afectado, a la decisión inicial sobre su clasificación.

La EPA publica tres tipos de documentos: *Notices*, *Proposals* y *Rules*. Las sustancias que se consideren aceptables se notifican mediante avisos (*Notices of acceptability*), mientras que aquellas inaceptables o con restricciones de uso son primero propuestas (*Proposal*) y, tras un periodo de 60 días de discusión, se convierte en una regla (*Rule*). Las *Notices* no necesitan pasar por ningún proceso legislativo puesto que el uso de la sustancia en cuestión no está restringido en absoluto ni puede conllevar sanción alguna. En cambio, una *Rule* sí se considera ley. Ambas se publican en el CFR.

Los principios rectores del programa SNAP son siete:

1. Las sustancias se evalúan en comparación con el resto de las sustancias que se usen en esa aplicación.
2. Una sustancia puede considerarse aceptables, aunque no esté totalmente exenta de riesgo. Una sustancia aceptable es, como se dijo anteriormente, la que es significativamente menos peligrosa que el resto de las alternativas.
3. Solo se considerarán inaceptables las alternativas que sean claramente peores.

4. El riesgo se evalúa por uso y no por sustancia, puesto que cada aplicación implica unos niveles diferentes de exposición. Esto significa que un fluido puede ser inaceptable en ciertos usos, pero aceptable en otros.
5. La EPA se compromete a evaluar las alternativas emergentes con la mayor rapidez posible.
6. La EPA no apoya productos de compañías concretas. La evaluación puede basarse en información de equipos específicos, pero la decisión no representa únicamente a dicho producto.
7. La EPA tiene en consideración el resto de normativa medioambiental elaborada por otras Agencias.

Como se ha mencionado, la EPA tiene en cuenta criterios de seguridad y salud de las personas, así como consideraciones medioambientales:

- Efectos atmosféricos: potencial de agotamiento de ozono (ODP) y el potencial de calentamiento global (GWP).
- Evaluación de la exposición a fugas en el entorno de trabajo, en hogares, al ambiente, al agua o procedentes del tratamiento de residuos sólidos.
- Toxicidad: existen diferentes índices para evaluar la toxicidad como el Límite de Exposición Permisible (PEL), etc.
- Inflamabilidad: temperatura de autoignición o los límites de inflamabilidad.
- Otros impactos medioambientales como sus potenciales efectos sobre ecosistemas o en la calidad del aire si son o generan compuestos orgánicos volátiles (VOCs).

También se considera el coste económico de la alternativa analizada, pero solo para juzgar las posibilidades reales de que dicha alternativa sea aceptada por el mercado. No se considera el coste de transición de sustituir una sustancia ahora inaceptable por otra permitida, es decir, no se compara el coste de las distintas alternativas entre sí.

En 1994, la finalidad del programa SNAP era contribuir al *phase-out* de las sustancias que agotan la capa de ozono. Muchas de estas sustancias, llamadas de Clase I, fueron reemplazados por sustancias de Clase II como los HCFCs, aunque ya se sabía entonces que éstos también acabarían siendo eliminados. Hoy en día, además de los riesgos para la salud humana, que siempre han sido un criterio esencial, se presta mucha más atención al GWP de estas sustancias, principalmente porque la información disponible hoy es mucho mayor que hace veinte años. En este sentido, fue la Regla del 20 de julio de 2015 la primera que cambió la clasificación de ciertos HFCs de muy alto potencial de calentamiento atmosférico de aceptable a inaceptable. Un nuevo paso en el veto de los HFCs se dio en la Regla del 1 de diciembre de 2016. La última regla fue la del 8 de agosto de 2018 que establece las restricciones de uso del R-600a, el R-290 y el R-441A en refrigeración doméstica. Desde entonces el programa SNAP no ha publicado ninguna otra regla, fiel reflejo de cómo la actual Administración de los EE. UU. ha paralizado por completo las políticas de protección del medioambiente [EPA, 2019a)]. Es más, estas últimas prohibiciones a HFCs no están exentas de polémica. Son muchos los que consideran que la EPA se está excediendo en sus competencias ya que, como el objetivo original del programa SNAP, que era sustituir los CFC y HCFC por otras sustancias que no agotasen el ozono estratosférico, ya se ha logrado, sostienen que la EPA no puede tener autoridad para vetar refrigerantes con un ODP nulo.

El sector de la refrigeración y el acondicionamiento de aire se subdivide en dieciséis usos finales: (1) enfriadoras de agua para climatización, (2) cámaras de conservación en frío, (3) máquinas de producción de hielo en establecimientos comerciales, (4) refrigeración doméstica, (5) pistas de patinaje sobre hielo, (6) acondicionamiento de aire en procesos industriales, (7) refrigeración industrial, (8) MVACs, (9) sistemas de intercambio de calor no mecánicos, (10) AC residencial y bombas de calor, (11) deshumidificadores residenciales, (12) refrigeración en transportes, (13) refrigeración comercial, (14) máquinas expendedoras, (15) refrigeración de muy baja temperatura, y (16) enfriadoras de agua para consumo [EPA, 2018].

A su vez, cada uno de estos dieciséis usos finales puede subdividirse o no. Por ejemplo, las enfriadoras de agua para climatización pueden ser de compresor centrífugo o de desplazamiento positivo. Sea como fuere, se proporciona para cada una de las categorías un listado con los refrigerantes que alguna vez se han empleado en esos sistemas, junto a su clasificación en las cuatro categorías vistas anteriormente. Si la clasificación es “aceptable con restricciones de uso”, entonces se adjunta la Regla correspondiente donde se detallan esas especificaciones.

A continuación, estudiaremos los chillers para climatización, la refrigeración doméstica, la refrigeración comercial, la refrigeración industrial, los MVACs y los equipos autónomos de climatización.

2.3.2.1 Chillers [EPA, 2017d)]

Los chillers son enfriadoras de agua empleadas en climatización. Las enfriadoras de agua para consumo humano o los chillers empleados en procesos industriales se encuentran en otra categoría. Se clasifican según su compresor en centrífugos o en desplazamiento positivo. Los chillers centrífugos tienen capacidades frigoríficas de 200-21000 kW, mayores que los chillers de desplazamiento positivo cuyas capacidades oscilan entre los 10-1800 kW para compresores alternativos, 10-7000 kW para los screw y 10-1800 kW para los scroll. Para cada caso la EPA proporciona un listado diferente de alternativas.

La SNAP establece, mediante la regla del 1 de diciembre de 2016, una serie de refrigerantes o mezclas inaceptables a partir del 1 de enero de 2024. Para los chillers centrífugos hay 26 refrigerantes y mezclas vetados, mientras que para los chillers de desplazamiento positivo las sustancias inaceptables son 25. Para los centrífugos, el refrigerante prohibido con menor GWP es el R-245fa con un GWP 1030, mientras que en los de desplazamiento positivo el de menor GWP es el R-134a con GWP de 1430.

Para los dos tipos de chillers los refrigerantes aceptables más destacados son el R-1234ze (GWP 6), el R-450A (GWP 601), el R-744 (GWP 1) y el R-513A (GWP 630), siendo este último el de mayor GWP. El amoníaco (R-717, GWP 0) es un refrigerante aceptable para estas enfriadoras de agua porque sus riesgos -toxicidad alta y leve inflamabilidad- están controlados con la tecnología actual y se compensan sobradamente con sus ventajosas propiedades termodinámicas, medioambientales y bajo coste.

No existen refrigerantes aceptables sujeto a restricciones de uso para estas aplicaciones.

2.3.2.2 Refrigeración doméstica [EPA, 2019b)]

La refrigeración doméstica se refiere a frigoríficos y congeladores para conservación de alimentos usados principalmente en viviendas, aunque estos equipos puedan encontrarse también fuera de estos lugares como, por ejemplo, oficinas. También se incluyen aquí cajones refrigeradores, enfriadores de vino, minibares y máquinas de hielo para uso doméstico.

El R-134a (GWP 1430), el R-404A (GWP 3920), el R-407C (GWP 1770), el R-407F (GWP 1820), el R-410A (GWP 2090), entre otros menos conocidos, pasarán a ser inaceptables en nuevos equipos de refrigeración doméstica a partir del 1 de enero de 2021 por la regla del 1 de diciembre de 2016.

De los 27 refrigerantes y mezclas vetados a partir de 2021, el que menor GWP tiene es el R-134a con un GWP de 1430. Esto es coherente con los refrigerantes que se catalogan como aceptables, puesto que los de mayor GWP son el R-450A (GWP 601) y el R-513A (GWP 630). El primero es una mezcla entre R-134a y R-1234ze, mientras que el segundo es una mezcla entre R-134a y R-1234yf. También está permitido sin restricciones el R-152a (GWP 124) aunque sea de clase A2.

El R-290 (GWP 3), el R-600a (GWP 3) y el R-441A (GWP 5) pueden utilizarse con ciertas restricciones de uso. Estas condiciones se encuentran en la regla del 8 de agosto de 2018. Esta regla modifica las condiciones de uso del R-290, R-600a y R-441A en refrigeración doméstica con respecto a las establecidas en reglas anteriores. Se aumenta de 57 a 150 gramos la carga máxima permitida de estos refrigerantes en frigoríficos y congeladores domésticos. Para tomar esta decisión se simuló el efecto que tendría una fuga de refrigerante en una cocina de 18 m³ -que es aproximadamente la mitad de tamaño que la media en EE. UU. y- en otra de 53 m³. Los resultados concluyeron que comienza a existir un mínimo peligro de ignición en la situación de estudio más desfavorable para una cocina con volumen 23 m³, por lo que el límite de 150 gramos se considera seguro.

2.3.2.3 Refrigeración industrial [EPA, 2019c)]

La refrigeración industrial incluye todos los sistemas que enfríen corrientes de procesos para alguna aplicación industrial. Hay una gran variedad de sistemas según sea la temperatura de operación y el foco con el que se pueda condensar.

No hay ningún refrigerante o mezcla que se considere inaceptable para los sistemas de refrigeración industrial. Los refrigerantes de todos los grupos de seguridad son aceptables, desde el R-134a (A1) hasta el R-290 (A3),

R-744 (A1) o el amoníaco R-744 (B2L).

En cámaras frigoríficas sí están vetados los refrigerantes con GWP superior a 2090 a partir del 2023 a través de la regla del 1 de diciembre de 2016. Esto deja fuera al R-404A, al R-407A o al R-410A, entre otros. No se permiten los refrigerantes de clase A3 como el R-290 o el R-600a. Según la propia EPA, la gran mayoría de cámaras frigoríficas en los Estados Unidos utilizan el R-717 como refrigerante.

2.3.2.4 Refrigeración comercial [EPA, 2017c]

La refrigeración comercial incluye equipos para almacenar, exponer, procesar o dispensar productos fríos o congelados en establecimientos comerciales. Este uso final incluye equipos compactos, unidades de condensación y los diferentes sistemas encontrados en supermercados. También están aquí incluidas las máquinas expendedoras de alimentos refrigeradas, que habitualmente combinan ingredientes, mezclan y preparan el producto a una determinada temperatura, empleando bombas de calor o aprovechando el calor residual de un ciclo de refrigeración para calentar bebidas, pero quedan fuera del alcance de este análisis.

Los equipos compactos son frigoríficos o congeladores ensamblados y cargados al completo en fábrica. Desde el 1 de enero de 2020, debido a la Regla del 20 de julio de 2015, están prohibidos en sistemas de media temperatura (por encima de 0°C) el R-134a (GWP 1430), el R-404A (GWP 3920), el R-407A (GWP 2110), el R-407F (GWP 1820) y el R-410A (GWP 2090), entre otros 30 refrigerantes. En aplicaciones de baja temperatura (por debajo de 0°C) también están prohibidos estos refrigerantes con excepción del R-134a (GWP 1430) y el R-426A (GWP 1510), que son refrigerantes muy empleados en esta aplicación. Para media temperatura el R-513A (GWP 630) es el refrigerante permitido de mayor GWP. Otros refrigerantes permitidos son el R-744, R-290, R-441A y el R-600a. Estos tres últimos pueden usarse, pero sujeto a condiciones según la regla del 20 de julio de 2015. Además de restricciones de seguridad en el diseño de los equipos, se limita la carga a 150 gramos.

Las unidades de condensación remota son equipos con capacidades frigoríficas de 1kW a 20kW que incluyen el o los compresores y el condensador y se ubican en el exterior, mientras que el evaporador se encuentra en el interior del local para conservar alimentos. Desde el 1 de enero de 2018 no pueden utilizarse ni el R-404A (GWP 3920), el R-407B (GWP 2800) o el R-507/R-507A (GWP 3990), entre otros, según la Regla del 20 de julio de 2015. Estas prohibiciones son debidas al alto GWP de estas sustancias, siendo el R-422D el refrigerante inaceptable de menor GWP (2730) y el R-421A (GWP 2630) el aceptable de mayor GWP. No hay fluidos aceptables sujeto a restricciones de uso para este uso. Los refrigerantes R-134a (GWP 1430), R-407A (GWP 2110), R-407F (GWP 1820) y R-744 (GWP 1) se consideran aceptables sin ninguna restricción.

En los supermercados de gran superficie encontramos sistemas directos y sistemas indirectos. En los directos el refrigerante es distribuido a la zona de venta hacia los expositores de alimentos. En los indirectos se emplea un sistema en cascada con un refrigerante secundario que es el que se distribuye a la zona de ventas. Las restricciones son idénticas a las del caso anterior.

En todos los casos se permite el uso del R-717 como refrigerante primario en un circuito en cascada.

2.3.2.5 MVACs [EPA, 2019d]

Los Motor Vehicle Air Conditioning son los equipos de aire acondicionado para vehículos. Nos centraremos en vehículos diferentes a autobuses y trenes, pues en estos los sistemas de climatización suelen ir instalados en el techo de los vagones como unidades independientes y tienen una carga mayor que los AC del resto de vehículos. Por tanto, el siguiente análisis es válido para vehículos como coches particulares, furgonetas, todoterrenos o camiones.

El R-134a (GWP 1430) es el refrigerante más utilizado en estas aplicaciones. En la regla del 20 de julio de 2015 se establece que será inaceptable a partir de 2021, excepto en aquellos Estados donde no existan las infraestructuras necesarias para emplear alguno de los refrigerantes alternativos. Esta moratoria se extenderá hasta 2025, y a partir del 1 de enero de 2026 el R-134a estará totalmente prohibido para estas aplicaciones en todo el territorio.

El R-1234yf (GWP 4) y el R-152a (GWP 124) podrán utilizarse si se respetan las restricciones establecidas en la regla del 1 de diciembre de 2016 y en la regla del 12 de junio de 2008, respectivamente, en cuanto a estándares de seguridad. También podrá utilizarse el CO₂ (R-744) si se respetan las condiciones de la regla del 6 de junio

de 2012.

Cualquier refrigerante diferente a los anteriores se considera inaceptable desde 2017.

2.3.2.6 AC y bombas de calor residencial [EPA, 2019e]

Se incluyen todos los sistemas autónomos para climatización. A diferencia de los sistemas centralizados, en estos sistemas el aire de los locales es acondicionado directamente por el refrigerante, sin emplear ningún fluido intermedio como sí sería el caso de las enfriadoras de agua estudiadas en el apartado de chillers. Se incluyen los equipos tanto para viviendas como para comercios. Entre estos apartados encontramos splits, multisplits, sistemas VRF, aires acondicionados portátiles, unidades de ventana, rooftop compactos, bombas de calor, etc.

Solo hay dos refrigerantes inaceptables: el R-1270 por ser su alta inflamabilidad y toxicidad, y el R-443A por el mismo motivo. Estos están prohibidos desde la regla del 1 de diciembre de 2016 para todas las aplicaciones de refrigeración y aire acondicionado.

Entre los refrigerantes aceptables destacan el R-134a (GWP 1430), el R-404A (GWP 3920), el R-407A (GWP 2110), el R-407C (GWP 1770), el R-407F (R-1820) y el R-410A (GWP 2090).

El R-32 (GWP 675), el R-290 (GWP 3) y el R-441A (GWP 5) son aceptables, pero sujeto a ciertas restricciones según la Regla del 10 de abril de 2015.

Para esta aplicación no se observa ninguna restricción asociada al GWP. Los refrigerantes aceptables son los que forman parte del grupo de seguridad A1, mientras que los refrigerantes sujetos a restricciones son inflamables, pero bajo GWP. No se encuentran las olefinas R-1234yf ni R-1234ze en las tablas para este uso final. De hecho, tan solo el Estado de California ha propuesto modificar su código de la edificación para incluir restricciones a los refrigerantes en aplicaciones de Aire Acondicionado para limitar el GWP a 750 desde el 1 de enero de 2023.

Según Contracting Business [2020], las restricciones a las restricciones a los refrigerantes en estas aplicaciones acabarán llegando a los EE. UU. porque la transición a los refrigerantes de bajo GWP es inevitable por dos motivos. En primer lugar, los Estados Unidos tendrán que ratificar la Enmienda de Kigali inevitablemente antes de 2033 pues si no lo hacen no podrán comerciar gases HFC con los países que sí lo hayan hecho. En segundo lugar, cuánto más tarde un país en comenzar el *phasedown* más complejo y costoso se vuelve para conseguir los objetivos marcados. Y es que el calendario establecido en la Enmienda de Kigali empezó a andar en 2019 y no esperará a nadie. Cuando los Estados Unidos la ratifiquen tendrán que hacer frente con los objetivos marcados para esa fecha. Si el abandono de los HFC se ha decidido que sea escalonado es porque la industria necesita tiempo para adaptarse y desarrollar la tecnología para fabricar aparatos con refrigerantes de bajo GWP. También la legislación como veremos en el siguiente capítulo necesita maduración. A diferencia de la crisis con el agotamiento de la capa de ozono, ahora los refrigerantes considerados alternativos sí tienen problemas de inflamabilidad y de toxicidad. La legislación actual no está preparada para aceptar estas sustancias y posiblemente no lo esté hasta la siguiente década.

Regla del 10 de abril de 2015 [EPA, 2015]

Esta regla establece las condiciones de uso para el R-32, el R-290 y el R-441A en AC y bombas de calor residencial. Se comenta por su especial complejidad y su importancia en el capítulo siguiente. Para este uso, la carga máxima permitida dependerá de las dimensiones del local y de la LFL del refrigerante según la fórmula 2-1.

$$m_{m\acute{a}x} = 2.5 \cdot LII^{\frac{5}{4}} \cdot h_o \cdot A^{0.5} \quad (2-1)$$

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 .

Con una cota superior de 8 kg para el R-32 y 1 kg para el R-290 y el R-441A. La fórmula anterior permite determinar la carga máxima de refrigerante para que no haya problemas de seguridad dadas las dimensiones de la vivienda. Aun así, en esta Regla se llama la atención al hecho de que este análisis es poco práctico pues nada asegura que el cliente elija correctamente un equipo para la sala que quiera climatizar. Incluso es poco probable que conozca las dimensiones de dicha estancia. Por tanto, la EPA en esta Regla establece cinco tablas: una para

unidades de ventana, otra para PTACs (packaged terminal AC and heat pumps units), una tercera para equipos de pared, otras para unidades de techo y, por último, una tabla para equipos de AC portátiles. Cada tabla establece la carga máxima para cada uno de los tres refrigerantes regulados en función de la potencia del equipo. En la Tabla 7 se muestra la tabla correspondiente a los equipos de pared. De esta manera se transfiere el problema del usuario final a los fabricantes de equipos, quienes no tendrán limitada la carga según la potencia que dé el aparato.

Tabla 7. Ejemplo de tabla de la Regla del 10 de abril de 2015 para equipos de pared

TABLE 4—WALL-MOUNTED AC UNITS * WITH COMPRESSOR 1.8 m ABOVE FLOOR LEVEL *
[Maximum charge size by unit capacity and refrigerant used]

Refrigerant	Charge size in kg (by associated capacity in BTU/hr)													
	5,000	6,000	7,000	8,000	9,000	10,000	12,000	14,000	18,000	21,000	23,000	24,000	30,000	34,000
R-32	3.12	3.82	4.94	5.41	5.84	6.24	6.62	7.32	7.96	7.96	7.96	7.96	7.96	7.96
R-290	0.23	0.28	0.36	0.40	0.43	0.46	0.49	0.54	0.61	0.73	0.80	0.86	0.89	1.00
R-441A	0.25	0.31	0.40	0.44	0.47	0.51	0.54	0.59	0.67	0.80	0.88	0.95	0.98	1.00

* Assumes the evaporator is at least 1.8 m, but not more than 2.2 m, above the floor. Cooling capacities between those in the table are to be linearly interpolated between the next smaller and larger capacities listed in the table.

Para alcanzar estas conclusiones es necesario disponer de unas correlaciones entre la superficie a climatizar y la potencia necesaria para cubrir su demanda. Esta información se obtuvo del programa Energy Star de la EPA (ver Tabla 8).

Tabla 8. Estimación de la demanda de climatización en función del área acondicionada

Rango	A min (ft ²)	A max (ft ²)	A min (m ²)	A max (m ²)	Demanda (BTU/h)	Demanda (W)
100-150	100	150	9.29	13.94	5000	1464.5
150-250	150	250	13.94	23.23	6000	1757.4
250-300	250	300	23.23	27.87	7000	2050.3
300-350	300	350	27.87	32.52	8000	2343.2
350-400	350	400	32.52	37.16	9000	2636.1
400-450	400	450	37.16	41.81	10000	2929
450-550	450	550	41.81	51.10	12000	3514.8
550-700	550	700	51.10	65.03	14000	4100.6
700-1000	700	1000	65.03	92.90	18000	5272.2
1000-1200	1000	1200	92.90	111.48	21000	6150.9
1200-1400	1200	1400	111.48	130.06	23000	6736.7
1400-1500	1400	1500	130.06	139.35	24000	7029.6
1500-2000	1500	2000	139.35	185.81	30000	8787
2000-2500	2000	2500	185.81	232.26	34000	9958.6

2.3.3 Canadá

Canadá ratificó la Enmienda de Kigali en 2017. Las medidas para reducir el consumo de HFC se encuentran en la “Regulations Amending the Ozone-depleting Substances and Halocarbon Alternatives Regulations” del 5 de octubre de 2017, que modifica la “Ozone-depleting Substances and Halocarbon Alternatives Regulations” que es la norma canadiense para cumplir con los objetivos del Protocolo de Montreal [Gazette, 2017].

En primer lugar, se controlan las importaciones de HFC a granel y aparatados cargados mediante un sistema de permisos de consumo, parecido al sistema de cuotas de la Unión Europea, que reducirá progresivamente la

cantidad de HFC que pueden ser comercializados en Canadá.

En segundo lugar, se establece una hoja de ruta de prohibiciones a ciertos refrigerantes según su GWP para algunas aplicaciones (ver Tabla 9). En el propio documento se comentan cuales serán los refrigerantes afectados por cada sector, así como cuáles son las alternativas más factibles.

Tabla 9. Hoja de ruta de prohibiciones en Canadá a HFC según su GWP para determinadas aplicaciones

FECHA	PROHIBICIÓN
1 de enero de 2020	Equipos compactos para uso comercial en aplicaciones de media temperatura (>0°C) con GWP igual o superior a 1400
1 de enero de 2020	Equipos compactos para uso comercial en aplicaciones de baja temperatura (<0°C, pero >-50°C) con GWP igual o superior a 1500
1 de enero de 2020	Sistemas centralizados de refrigeración para uso comercial o industrial con GWP igual o superior a 2200
1 de enero de 2020	Unidades de condensación para uso comercial o industrial con GWP igual o superior a 2200
1 de enero de 2021	MVACs con GWP igual o superior a 150
1 de enero de 2025	Frigoríficos y congeladores domésticos con GWP igual o superior a 150
1 de enero de 2025	Enfriadoras de agua para refrigeración o aire acondicionado usadas en el sector comercial o industrial con GWP igual o superior a 750
1 de enero de 2025	Sistemas de refrigeración en el transporte con GWP igual o superior a 2200

A fecha de hoy, las prohibiciones que tuvieron lugar a partir del 1 de enero de 2020 han afectado principalmente al sector comercial. Para frigoríficos y congeladores comerciales ya no pueden emplearse el R-404A (GWP 3922), el R-507A (GWP 3985), el R-407A (GWP 2107) y, solo en frigoríficos por ser media temperatura, el R-134a (GWP 1430), siendo esperado que se sustituyan por R-290 (GWP 3). Para sistemas centralizados de refrigeración comercial estarán vetados el R-404A (GWP 3922) y el R-507A (GWP 3985), pero sí podrán seguir utilizándose el R-407A (GWP 2107) y el R-134A (GWP 1430) y, cuando la eliminación progresiva así lo exija, se espera una transición al R-744 (GWP 1).

En MVACs estará prohibido el R-134a (GWP 1430) a partir del 1 de enero de 2021 y se espera que lo sustituya el R-1234yf (GWP 4).

A partir de 2025, para frigoríficos y congeladores domésticos no podrán importarse equipos con R-134a (GWP 1430). Para estas aplicaciones esta legislación no comenta alternativas puesto que estos equipos no se fabrican en Canadá, sino que se importan. Aun así, el refrigerante que se espera que sustituya al R-134a es el R-600a (GWP 3).

En chillers, la limitación a 750 dejará fuera al R-134a (GWP 1430), el R-245fa (GWP 1030) y al R-407C (GWP 1774), entre otros. Se espera que lo sustituyan HFC de bajo GWP como el R-450A (GWP 604) y el R-513A (GWP 631), así como diferentes HFOs.

Por último, en los sistemas de refrigeración para el transporte los tradicionales sistemas de R-404A (GWP 3922) y R-507A (GWP 3985) deberán dar paso a refrigerantes con GWP inferior a 2200 como el R-452A (GWP 2140) y, posteriormente, a refrigerantes de aún más bajo GWP como el R-448A (GWP 1387) o mezclas de HFO y HFC.

Los equipos de climatización doméstica no están directamente afectados por esta normativa, pero es de esperar que el sistema de permisos les afecte colateralmente. Los refrigerantes aquí empleados como el R-410A (GWP 2088) o el R-407C (GWP 1774) acabarán siendo sustituidos en algún momento por el R-32 (GWP 675) y, finalmente, por mezclas de HFC y HFO con GWP menores de 300.

2.3.4 Japón

En Japón, los HFC serán progresivamente eliminados gracias a la aprobación del “Act on Rational Use and Proper Management of Fluorocarbons” que entró en aplicación el 1 de abril de 2015. Esta norma será analizada a través de unas presentaciones elaboradas por The Japan Refrigeration and Air Conditioning Industry Association [JRAIA, 2018] [Ministry of Economy, Trade and Industry, 2019]. Se establece una hoja de ruta similar a las vistas para la Unión Europea o Canadá.

Tabla 10. Hoja de ruta de prohibiciones en Japón a HFC según su GWP para determinadas aplicaciones

FECHA	PROHIBICIÓN
1 de enero de 2018	Aparatos de aire acondicionado residencial con capacidades inferiores a 9 kW con GWP igual o superior a 750
1 de enero de 2019	Centrales frigoríficas con GWP igual o superior a 100
1 de enero de 2020	Aparatos de aire acondicionado para comercios con capacidades inferiores a 15 kW con GWP igual o superior a 750
1 de enero de 2023	Resto de equipos de aire acondicionado para comercios con GWP igual o superior a 750
1 de enero de 2023	MVACs con GWP igual o superior a 150
1 de enero de 2023	Enfriadoras de agua con compresor centrífugo con GWP igual o superior a 100
1 de enero de 2025	Unidades de condensación, y frigoríficos y congeladores comerciales con GWP igual o superior a 1500

En este informe también se señalan cuáles son los principales refrigerantes afectados y sus potenciales sustitutos. Para los aparatos de aire acondicionado el R-410A (GWP 2090) deberá dar paso al R-32 (GWP 675) en 2018 en A/C residencial y en 2020-2023 para oficinas y comercios. En los MVACs el R-134a (GWP 1430) tendrá que ser sustituido por el R-1234yf (GWP 4). Las enfriadoras de agua centrífugas no podrán utilizar a partir del 1 de enero de 2023 el R-245fa (GWP 1030), R-134a (GWP 1430) o R-410A (GWP 2088) y, dado el estricto límite a GWP inferior a 100, tendrá que ocurrir una transición a refrigerantes naturales como el R-744 (GWP 1) o el R-290 (GWP 3) o a HFO como R-1234ze(E) (GWP 7) o R-1234yf (GWP 4). Por último, en el sector comercial, las centrales frigoríficas están limitadas a GWP inferior a 100 desde 2019 por lo que la tendencia será a sistemas indirectos en cascada con R-717 en alta y R-744 en baja. Las unidades de condensación, así como los frigoríficos y congeladores comerciales, tendrán que abandonar el R-404A (GWP 3922) y el R-410A (GWP 2088) en favor, primero, de HFC de bajo GWP como el R-448A (GWP 1387) o el R-463A (GWP 1494) y, finalmente, a R-744 (GWP 1).

No se observan restricciones a los equipos de refrigeración doméstica, pero porque la gran mayoría de frigoríficos y congeladores domésticos comercializados en Japón ya utilizan R-600a.

2.3.5 Australia

Australia comenzó la eliminación progresiva de los HFC el 1 de enero de 2018 con la entrada en vigor de una

enmienda a su Ozone Protection and Synthetic Greenhouse Gas Management Act. Se estableció un sistema de cuotas que controla el consumo de gases a granel. A diferencia del sistema de cuotas de la Unión Europea, en este no se computan los equipos precargados [Australian Government, 2018].

El sistema de cuotas consiste en autorizar a cada uno de los importadores de HFC a granel con una cantidad máxima de HFC medida en toneladas equivalentes de CO₂ que se irá reduciendo cada un cierto periodo para cumplir con el calendario de reducción de la Enmienda de Kigali. Se reserva una parte de la cuota para empresas nuevas.

Por el momento no parece que Australia vaya a desarrollar una hoja de ruta de prohibiciones al estilo de los países que hemos visto en apartados anteriores.

2.3.6 China

En China el abandono de los HCFC y los HFC ocurrirán simultáneamente. El gobierno de China no ha establecido prohibiciones explícitas, tan solo una serie de recomendaciones para sustituir los refrigerantes actuales a corto y medio plazo (ver Tabla 11).

Tabla 11. Recomendaciones del Gobierno chino para reemplazar los HCFC y HFC [Danfoss, 2018].

Aplicación	Actual	Corto plazo (2020)	Medio plazo (2025)
Refrigeración doméstica	R-22, R-600a	R-600a	R-600a
Refrigeración comercial e industrial	R-22, R-134a, R-410A, R-717	R-134a, R-717	R-717, R-744, R-290, R-600a, mezclas de bajo GWP
Chillers de pequeño y mediano tamaño	R-22, R-410A	R-410A, R-32	R-290, R-32
Chillers de gran tamaño	R-22, R-123, R-134a	R-134a, R-1234ze	R-1234ze, R-717
A/C compactos y VRV	R-22, R-410A, R-407C	R-410A, R-32	R-32, mezclas bajo GWP
A/C residencial	R-22, R-410A	R-410A, R-290	R-290, R-32

2.3.7 Comparación de las medidas adoptadas por los países estudiados

En este apartado se van a comparar los distintos reglamentos, más concretamente las hojas de rutas de prohibiciones de cada uno de ellos. Se comparan las restricciones adoptadas para los sectores de la refrigeración doméstica, enfriadoras de agua para climatización, aparatos Split de A/C, aparatos portátiles de A/C, aparatos de A/C para comercios, refrigeración comercial dividida en aparatos compactos de media temperatura (frigoríficos para uso comercial), aparatos compactos de baja temperatura (congeladores de uso comercial), centrales frigoríficas y unidades de condensación, y MVACs.

Excepto Australia, que como se comentó en el apartado 2.3 tiene un consumo de HFC muy inferior al resto de países estudiados, los demás territorios han establecido una hoja de ruta de prohibiciones a la comercialización de diferentes gases fluorados de efecto invernadero según su GWP para algunas aplicaciones determinadas. En realidad, el programa SNAP de los Estados Unidos no discrimina directamente a los refrigerantes por su GWP, pero analizando las medidas adoptadas tal y como se ha hecho en los apartados correspondientes, sí pueden inferirse unos límites de GWP por encima de los cuales todos los refrigerantes existentes están prohibidos para dichas aplicaciones.

En la refrigeración doméstica, excepto Japón que no establece ninguna restricción a este uso, los otros tres países coinciden en límites muy bajos de 150 kg CO₂ en la Unión Europea y Canadá, y de 630 kg CO₂ en Estados Unidos. Si nos fijamos en las fechas, esta restricción tan solo es de aplicación actual en la Unión Europea. El veto al R-134a (GWP 1430) no será efectivo en Estados Unidos hasta 2021 y en Canadá hasta 2025.

Con respecto a los MVACs el criterio de reducir el GWP a 150 es unánime, aunque la entrada en vigor de esta medida se extiende desde 2017 en la Unión Europea a 2023 en Japón. En Canadá y Estados Unidos el abandono del R-134a (GWP 1430) por el R-1234yf (GWP 4) será efectivo en 2021. Durante un tiempo se planteó utilizar R-152a por su bajo GWP (124) y propiedades similares a las del R-134a, pero al ser este un refrigerante inflamable de clase A2 las exigencias de seguridad eran demasiado elevadas. También es posible emplear R-744.

La discusión de la refrigeración comercial hay que hacerla por aplicaciones:

- En aparatos compactos de media temperatura, es decir, frigoríficos de uso comercial, es Estados Unidos quien establece el veto más restrictivo, limitando el GWP a 630 desde 2020, frente a los 1400 de Canadá y los 2500 de la Unión Europea para la misma fecha. Aun así, desde 2022 será la Unión Europea la más restrictiva con un GWP límite de tan solo 150. En aparatos compactos de baja temperatura, es decir, congeladores de uso comercial, Estados Unidos y Canadá establecen desde 2020 límites muy similares de 1510 y 1500, respectivamente, mientras que en la Unión Europea las restricciones a este uso son de 2500 desde 2020, pero en 2022 se reducirá el GWP a 150, muy por debajo del resto de países analizados. Por su parte, Japón tiene la restricción más laxa pues las restricciones llegarán en 2025, más tarde que en el resto de los países, y el GWP estará limitada a 1500.
- En centrales frigoríficas el programa SNAP de Estados Unidos se adelanta a las otras normativas fijando un GWP inferior a 2630 desde 2017, pero aquí destaca claramente Japón con un estricto límite de 100 a partir de 2019. En 2020, Canadá lo restringirá a 2200. La Unión Europea comienza con una restricción a 2500 desde 2020 y lo disminuirá a 150 desde 2022, aunque permitirá usar refrigerantes con GWP hasta 1500 en los circuitos primarios de sistemas en cascadas, permitiendo así el R-134a (GWP 1430).
- Para las unidades de condensación las cuatro normativas establecen restricciones. Desde 2018, en Estados Unidos el GWP deberá ser inferior a 2630. Desde este año 2020, en la Unión Europea y Canadá el GWP está fijado a 2500 y 2200, respectivamente, en total consonancia con el programa SNAP. En esta aplicación, es Japón la más restrictiva fijando el GWP a 1500 a partir de 2025.

En aplicaciones de climatización hay que distinguir entre sistemas centralizados y sistemas autónomos:

- Para sistemas centralizados encontramos restricciones a las enfriadoras de agua en todos los reglamentos. En el 517/2014 de la Unión Europea no se mencionan explícitamente, pero les afecta la restricción general de limitar el GWP a 2500 desde 2020 en cualquier sistema estacionario de refrigeración, aunque no son habituales los refrigerantes con GWP superior a 2500 en estos sistemas. Desde 2024, el programa SNAP limita el GWP a 630. Algo similar ocurre en Canadá, quedando restringido a 750 desde 2025. Japón tiene la normativa más exigente para enfriadoras de agua, donde los refrigerantes deberán tener GWP inferior a 100 a partir de 2025.
- Para sistemas autónomos tan solo la Unión Europea y Japón han establecido prohibiciones. Coinciden en fijar el GWP a 750 en splits de viviendas, aunque en Japón esta medida se empezó a aplicar ya en 2018 y en la Unión Europea aun tendremos que esperar hasta 2025. Extiende Japón este requisito a aparatos de A/C para comercios, desde este año 2020 si la potencia es inferior a 15 kW y para el resto de los equipos a partir de 2023. El Reglamento F-Gas es el único que limita el GWP en aparatos portátiles de A/C, donde se exige un GWP inferior a 150 desde el 1 de enero de 2020.

Tabla 12. Comparación entre las restricciones establecidas en la Unión Europea, los Estados Unidos, Japón y Canadá

Aplicación	Unión Europea	Estados Unidos	Japón	Canadá
Refrigeración doméstica	< 150 desde 2015	< 630 desde 2021	Ninguna	< 150 desde 2025
Frigoríficos de uso comercial	< 2500 desde 2020, < 150 desde 2022	< 630 desde 2020	< 1500 desde 2025	< 1400 desde 2020
Congeladores de uso comercial	<2500 desde 2020, < 150 desde 2022	< 1510 desde 2020	< 1500 desde 2025	< 1500 desde 2020
Unidades de condensación	< 2500 desde 2020	< 2630 desde 2018	< 1500 desde 2025	< 2200 desde 2020
Centrales frigoríficas	<2500 desde 2020, < 150 desde 2022, excepto < 1500 en refrigerante primario de sistemas en cascadas	< 2630 desde 2017	< 100 desde 2019	< 2200 desde 2020
Aparatos portátiles de A/C	< 150 desde 2020	Ninguna	Ninguna	Ninguna
Aparatos de A/C Splits	< 750 desde 1 de enero de 2025	Ninguna	< 750 desde 2018	Ninguna
Aparatos de A/C para comercios	Ninguna	Ninguna	< 750 desde 2020 para equipos de menos de 15 kW, < 750 desde 2023 para resto	Ninguna
Enfriadoras de agua para climatización	<2500 desde 2020	< 630 desde 2024	< 100 desde 2025	< 750 desde 2025
MVACs	< 150 desde 2017	< 150 desde 2021	< 150 desde 2023	< 150 desde 2021

Cabría preguntarse a que se deben estas discrepancias en cuanto al objetivo de reducción de GWP y las fechas establecidas. Hay que tener en cuenta que el objetivo es el mismo: conseguir la reducción en el consumo de HFC establecidos en la Enmienda de Kigali. Por tanto, estas hojas de ruta de cada territorio están adaptadas a la situación de partida de cada uno. Los vetos de cada región intentan ser una hoja de ruta realista que ataque a los sectores que en cada país más gases de efecto invernadero emiten y para los que existan alternativas de bajo GWP. Otros factores que afectan a la tecnología que existen en un país y, como consecuencia, a estos planes de abandono progresivo de los HFC son: el clima, los productos más extendidos, las tendencias de la industria, la conciencia de la población tanto medioambiental como en percepción del riesgo o los planes ejecutados por los Gobiernos en los últimos años. Por último, las fechas objetivo dependen del estado de desarrollo de la nueva tecnología. Se sitúan en los primeros años aquella tecnología prácticamente ya desarrollada, mientras que se deja para el futuro aquella que aun necesite maduración e investigación.

Por ejemplo, Japón no ha establecido restricciones a los refrigerantes empleados en refrigeración doméstica porque el refrigerante más empleado en estos equipos allí es el R-600a, cuyo GWP es menor de 4. Además, los principales responsables de las emisiones de gases de efecto invernadero en este país son, por un lado, los muebles frigoríficos del sector comercial y, por otro, los A/C tanto de viviendas como de comercio [Industria Formazione, 2017]. Como puede verse en la Tabla 10, la hoja de ruta establecida por el Ministerio de Economía, Comercio e Industria japonés se centra en esos sectores.

3 ANÁLISIS DE LAS NORMATIVAS INTERNACIONALES SOBRE FLUIDOS REFRIGERANTES

Los refrigerantes son fluidos caloportadores potencialmente peligrosos para la seguridad y salud de las personas. Realmente, todos los refrigerantes son seguros si se siguen guías de buenas prácticas como lo son los estándares sobre refrigeración. En la práctica, cualquier reglamento nacional de instalaciones frigoríficas está basado en una norma técnica de este tipo.

En el nivel superior se encuentran los “estándar de refrigerante”. En ellos se clasifican y establecen las propiedades de los fluidos refrigerantes. Los dos estándar de refrigerante son:

- La ISO 817:2014, que se aplica a nivel internacional.
- El ASHRAE 34:2019, que se utiliza en Estados Unidos.

Sobre estos estándares se apoyan, por un lado, los “estándar horizontales”, como la ISO 5149:2014, la europea EN 378:2016 y la americana ASHRAE 15:2019. En estas normas se establecen las condiciones de seguridad que deben cumplir todas las instalaciones frigoríficas, sean del sector que sean. Hay que señalar que la versión de 2016 de la norma EN 378 está completamente armonizada con la internacional ISO 5149:2014, siendo en esencia el mismo documento. En este capítulo se analizarán y compararán los procedimientos de cálculo de la carga máxima de refrigerante en una instalación frigorífica de estas normas.

Por otro lado, en paralelo con los estándares horizontales, se encuentran los “estándar verticales”. Estas normas están promulgadas por el International Electrotechnical Commission (IEC), el Comité Europeo de Normalización Electrotécnica (CENELEC) y, en Estados Unidos, Underwriters Laboratories (UL). Se diferencian de los estándares horizontales en que tan solo aplican a unas aplicaciones muy concretas, que son:

- Equipos compactos de refrigeración doméstica (IEC 60335-2-24, EN 60335-2-24, UL 60335-2-24).
- Equipos compactos de refrigeración comercial (IEC 60335-2-89, EN 60335-2-89 y UL 471).
- Equipos compactos y semicompactos de climatización (IEC 60335-2-40, EN 60335-2-40, UL 484 y UL 60335-2-40).

Los fabricantes de estos equipos siguen estos estándares por lo que analizarlos es crucial para entender si añaden barreras adicionales a los estándares horizontales en el uso de algunos refrigerantes, principalmente los hidrocarburos.

Por último, de los estándares horizontales emanan los Reglamentos nacionales. Estas normas son propias de cada país y las únicas de obligado cumplimiento. En la mayoría del globo estos Reglamentos están basados en la norma ISO 5149:2014 (EN 378:2016 en el caso de Europa), mientras que los Códigos de Edificación de los distintos Estados de los Estados Unidos se basan en el ASHRAE 15:2019.

3.1 Normas sobre clasificación de los refrigerantes

Existen dos grandes normas técnicas que evalúan y clasifican las propiedades de los refrigerantes en materia de seguridad: la ISO 817 y el ASHRAE 34. La primera es la norma internacional de referencia en todo el mundo excepto en los Estados Unidos, donde predomina la segunda.

Las dos normas son muy similares en su estructura. En primer lugar, se detalla la denominación alfanumérica de los refrigerantes. A continuación, se clasifican los refrigerantes en diferentes grupos según su toxicidad y su inflamabilidad. Por último, se calcula para cada uno de los refrigerantes conocidos su Límite de Concentración

de Refrigerante o RCL por sus siglas en inglés. Es en este apartado final donde la ISO 817 y el ASHRAE 34 tienen las mayores diferencias.

3.1.1 Denominación alfanumérica

El objetivo es establecer una forma inequívoca de nombrar a los refrigerantes que sea diferente a su fórmula o nombre químico. Esta denominación consiste en un prefijo seguido de una clave alfanumérica.

Con respecto al prefijo se admiten múltiples posibilidades: la palabra Refrigerant, R-, R seguido de espacio o incluso, para los refrigerantes halogenados, la abreviatura del grupo de compuestos químicos al que pertenecen (CFC, HCFC, HFC, HFO, etc.).

El código alfanumérico está conformado por una serie de números seguidos de algunas letras. El primer dígito comenzando por la derecha corresponde al número de átomos de flúor de la molécula. El siguiente hacia la izquierda es el número de átomos de hidrógeno más uno. El tercero por la derecha es el número de átomos de carbono menos uno, que si resultase cero no se escribe. Si además existen dobles enlaces entre carbonos se escribiría un cuarto número por la derecha igual a la cantidad de estos. El número de átomos de cloro en el refrigerante se determina saturando los enlaces que queden libres.

Cuando el refrigerante es un etano, es decir, tiene dos carbonos, entonces los diferentes isómeros posibles se identifican por una letra minúscula en función de su simetría, entendiendo la simetría en términos de reparto de masa atómica. La estructura más simétrica posible no lleva letra. Al aumentar la asimetría se le asigna las letras a, b, c, etc. Este es el caso del R-134a, cuya molécula es CH₂F-CHF₃ en lugar de la más simétrica que sería CHF₂-CHF₂.

Cuando el refrigerante es un propano, es decir, tiene una cadena de tres carbonos, los diferentes isómeros se diferencian mediante dos letras minúsculas. La primera se refiere al carbono central según la Tabla 13. La segunda letra se refiere a la diferencia de masas entre los carbonos C1 y C3. Encontramos aquí el propano (R-290, CH₃-CH₂-CH₃) y el R-245fa, cuya molécula es CF₃-CH₂-CHF₂.

Cuando el refrigerante es un propeno, es decir, tiene una cadena de tres carbonos con un doble enlace, los diferentes isómeros se diferencian mediante la asignación de dos letras minúsculas. La primera letra se refiere al carbono central y deberá ser x, y o z si ese carbono está unido a un Cl, F o H, respectivamente. La segunda letra se refiere al carbono unido mediante doble enlace al carbono central según la Tabla 13. Por último, si existe isomería trans se le añade el sufijo (E) y si es cis, entonces se usa el sufijo (Z). Un ejemplo sería la olefina R-1234ze(E). Este refrigerante está formado por tres carbonos con un doble enlace, 4 átomos de flúor y dos hidrógenos. La letra “z” nos indica que en el carbono central hay un hidrógeno. La letra “e” que en el carbono de uno de los extremos está unido al central con un doble enlace y sus dos otros enlaces son H y F. Por tanto, esta sustancia es inequívocamente el CHF=CH-CF₃. Además, sabemos que se trata del isómero trans.

Tabla 13. Designación de letras en propanos y propenos

Grupo	Letra
CCl ₂	a
CCIF	b
CF ₂	c
CHCl	d
CHF	e
CH ₂	f

A las mezclas de refrigerantes se le añade un número en la serie 400 si es no azeotrópica y del 500 si es azeotrópica. Este identificador no sigue ninguna regla, estando tabulados, y solo tienen en cuenta los componentes de la mezcla. En el caso de mezclas que utilicen los mismos componentes, pero en diferentes proporciones, se diferencian mediante las letras mayúsculas A, B, C, etc. al final de su nombre alfanumérico.

Los hidrocarburos de al menos cuatro carbonos se nombran usando la serie 600. Para refrigerantes desde 4 a 8

carbonos, su código se obtiene sumando 600 al número de carbonos menos cuatro. En el caso de que existan isómeros se diferencian con una letra minúscula obtenida de la Tabla 3 de la ISO 817. Por ejemplo, la letra “a” significa que la cadena tiene un grupo 2-metil. Este es el caso del R-600a cuya estructura molecular es isobutano o 2-metilpropano.

Por último, los refrigerantes inorgánicos se nombran utilizando la serie 700 acabada en el peso molecular de la sustancia. Los refrigerantes inorgánicos más conocidos son el amoníaco (peso molecular 17 kg/kmol, luego R-717) y el dióxido de carbono (peso molecular 44 kg/kmol, R-744).

3.1.2 Clasificación de seguridad

La clasificación de seguridad consiste en dos caracteres alfanuméricos (A/B para toxicidad, y 1/2/3 para inflamabilidad) seguido de una letra L si la velocidad de combustión es baja.

La toxicidad se evalúa en función del límite de exposición profesional. Se le asigna la letra A si es inferior a 400 ppm y la letra B es superior.

La inflamabilidad se mide en función del límite inferior de inflamabilidad (LFL), la temperatura de autoignición, el calor de combustión y la velocidad de combustión. De esta manera:

1. Refrigerantes sin propagación de llama al ser ensayados a 60°C y 101.3 kPa.

2L. Refrigerantes que no cumplen la condición para ser de clase 1; cuyo LFL es mayor a 3.5% según ISO 817 (0.10 kg/m³ en ASHRAE 34); su calor de combustión es inferior a 19000 kJ/kg y la velocidad de combustión es inferior a 10 cm/s a 23°C y 101.3 kPa.

2. Refrigerantes que cumplen todas las condiciones de la clase 2L excepto que su velocidad de combustión sea inferior a 10 cm/s a 23°C y 101.3 kPa.

3. Refrigerantes que no cumplen ninguna de las condiciones anteriores, bien porque su LFL sea inferior o igual a 3.5% según ISO 817 (0.10 kg/m³ en ASHRAE 34) o porque su calor de combustión sea superior o igual a 19000 kJ/kg.

Se observa un límite diferente entre las dos normas para separar las clases de inflamabilidad 2 y 3: mientras que la norma ISO 817 establece 3.5% v/v, el ASHRAE 34 fija 0.10 kg/m³. El factor de conversión para pasar de una concentración en volumen a una en masa no es constante para todos los refrigerantes, sino que interviene el peso molecular del refrigerante. En primer lugar, se utiliza la ley de los gases ideales para obtener el número de moles y, a continuación, el peso molecular (PM) para pasar de kmol a kg. El LFL se calcula a 23°C y 101.3 kPa.

$$LFL \left[\frac{kg}{m^3} \right] = LFL \left[\% \frac{v}{v} \right] \cdot 0.041117 \frac{kmol}{m^3} \cdot PM \left[\frac{kg}{kmol} \right] \cdot \frac{1}{100}$$

Si despejamos el PM de la expresión anterior y sustituimos el LFL umbral que separa las categorías 2 y 3 en ambas normas técnicas podemos calcular el PM que hace que ambos criterios sean similares,

$$PM \left[\frac{kg}{kmol} \right] = \frac{LFL \left[\frac{kg}{m^3} \right]}{LFL \left[\% \frac{v}{v} \right] \cdot 0.041117 \frac{kmol}{m^3} \cdot \frac{1}{100}} = 69.397 \frac{kg}{kmol}$$

Esto tiene la siguiente interpretación: si un refrigerante de la norma ISO 817 de inflamabilidad 3 tiene un PM superior a 69.397 kg/kmol es posible que en la norma ASHRAE 34 sea de inflamabilidad 2. Por el contrario, si un refrigerante es de inflamabilidad 3 en la ASHRAE 34 y su peso molecular es inferior a 69.397 kg/kmol, entonces podría tener un LFL superior a 3.5% y ser considerado como inflamabilidad media en la norma ISO 817.

Se han analizado las dos normas técnicas para buscar algún refrigerante inflamable que esté clasificado en clases diferentes por estos motivos. Se concluye que, a pesar de las diferencias en la definición de esta categoría de inflamabilidad, tanto la norma ISO 817 como el ASHRAE 34 clasifican a los refrigerantes en las mismas clases de seguridad.

En la Tabla 14 se combinan las dos clases de toxicidad con las cuatro clases de inflamabilidad para dar lugar a las ocho clases de seguridad.

Tabla 14. Clases de seguridad de los refrigerantes

		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	

3.1.3 Cálculo del RCL

Como se comentó en la introducción es aquí donde las normas ISO 817 y ASHRAE 34 difieren significativamente. Lo hacen por dos motivos.

Tabla 15. Comparación entre ATEL, LFL y RCL de los refrigerantes más importantes

Refrigerante	Norma	ATEL ppm	ODL ppm	LFL ppm	Justificación RCL	RCL ppm
R-134a	ISO 817	50000	140000	N/A	100% ATEL	50000
	ASHRAE 34	50000	140000	N/A	100% ATEL	50000
R-410A	ISO 817	170000	140000	N/A	100% ODL	140000
	ASHRAE 34	170000	140000	N/A	100% ODL	140000
R-32	ISO 817	220000	140000	144000	20% LFL	29000
	ASHRAE 34	200000	140000	144000	25% LFL	36000
R-1234yf	ISO 817	100000	140000	62000	20% LFL	12000
	ASHRAE 34	100000	140000	62000	25% LFL	16000
R-1234ze(E)	ISO 817	59000	140000	65000	20% LFL	13000
	ASHRAE 34	59000	140000	65000	25% LFL	16000
R-717	ISO 817	320	140000	167000	100% ATEL	320
	ASHRAE 34	320	140000	167000	100% ATEL	320
R-744	ISO 817	40000	140000	N/A	100% ATEL	40000
	ASHRAE 34	30000	140000	N/A	100% ATEL	30000
R-600a	ISO 817	25000	140000	18000	20% LFL	3600
	ASHRAE 34	25000	140000	16000	25% LFL	4000
R-290	ISO 817	50000	140000	21000	20% LFL	4200
	ASHRAE 34	50000	140000	21000	25% LFL	5300

El primero de ellos es en la manera de calcular el RCL. El Límite de Concentración de Refrigerante es un

parámetro que aúna los riesgos de toxicidad, inflamabilidad y desplazamiento de oxígeno. Se define como la máxima concentración admisible de refrigerante en el aire. Se calcula como el mínimo entre el ATEL (Límite de exposición de toxicidad aguda), el ODL (límite de anoxia) y el FCL (límite de concentración de inflamabilidad). Es en este último parámetro donde discrepan las dos normas: la ISO 817 define el FCL como el 20% del LFL, mientras que el ASHRAE 34 como el 25% del LFL.

En segundo lugar, se han observado pequeñas diferencias en los valores tabulados de ATEL y LFL para algunos refrigerantes. Por ejemplo, para el R-600a el LFL según la norma ISO es de 18000 ppm y de 16000 ppm según el ASHRAE 34.

Las dos consideraciones anteriores se observan en los valores de la Tabla 15. Por un lado, parece que la norma ISO 817 tabula valores de ATEL y LFL en ocasiones ligeramente superiores a los del ASHRAE 34. Aun así, en aquellos refrigerantes donde el RCL esté limitado por la inflamabilidad, el ASHRAE 34 proporciona valores de RCL mayores al calcularse este como el 25% y no el 20% del LFL. Puede concluirse que en general el RCL del ASHRAE 34 es superior al del ISO 817, excepto en el R-744 que muestra un RCL de 40000 ppm en la ISO 817 frente a los 30000 ppm del ASHRAE 34.

3.2 Norma EN 378:2016

La norma EN 378:2016 es la norma técnica europea que recoge los requisitos de elección, diseño, fabricación, ensayo, instalación, operación, mantenimiento, reparación y desmantelamiento que deben cumplir las instalaciones frigoríficas para minimizar el riesgo para las personas y su impacto medioambiental.

A efectos de este trabajo, interesa conocer los requisitos para la elección del refrigerante. El procedimiento se encuentra en el Anexo C de la parte 1 de dicha norma. El cálculo de la carga máxima de refrigerante se realiza en seis pasos:

1. Se determina la categoría del local y el tipo de emplazamiento del sistema.
2. Se determina la categoría de toxicidad del refrigerante y su límite de toxicidad como el máximo entre el ATEL/ODL y su límite práctico.
3. Se calcula la carga máxima permitida por toxicidad como el máximo entre el límite obtenido en la **tabla A** (ver Tabla 37 en Anexo B) y, para sistemas herméticamente sellados, el producto de 20 m^3 por el límite de toxicidad o 150 gramos para refrigerantes de toxicidad A.
4. Se determinar la clase de inflamabilidad y su límite inferior de inflamabilidad.
5. Se calcula la carga máxima permitida por inflamabilidad como el máximo entre el límite según la **tabla B** (ver Tabla 38 en Anexo B) y, en sistemas herméticamente sellados, el producto de m_1 por 1.5 para refrigerantes de inflamabilidad 2L, m_1 para refrigerantes de inflamabilidad 2 o 3, o 150 gramos.
6. Se calcula la carga máxima permitida para ese refrigerante como el mínimo entre la carga máxima permitida por toxicidad y la carga máxima permitida por inflamabilidad. En refrigerantes de inflamabilidad 1 solo se calcula la carga máxima permitida por toxicidad.

Para poder aplicar el procedimiento anterior hay que tener presente las clasificaciones que hace la norma a los locales y emplazamientos.

- Categoría del local (según su acceso)
 - **Categoría A. Acceso general:** locales en los que se puede pernoctar, en los que sus ocupantes tienen restringida su capacidad de movimiento, en los que no se controla el aforo o a los que puedan acceder personas que no conozcan las precauciones de seguridad. Por ejemplo, viviendas, hoteles, hospitales, prisiones, cines, escuelas, restaurantes o la zona abierta al público de los supermercados.
 - **Categoría B. Acceso supervisado:** locales en los que el aforo está limitado y alguno de los ocupantes está necesariamente familiarizado con las precauciones de seguridad. Por ejemplo, oficinas de empresa, laboratorios y pequeños comercios.
 - **Categoría C. Acceso Autorizado:** locales cerrados al público general al que solo pueden acceder personas que conozcan los requisitos de seguridad. Por ejemplo, cámaras frigoríficas,

- áreas restringidas de supermercados, refinerías o plantas de fabricación de productos químicos.
- Cuando coincidan dentro de un local más de una categoría de acceso entonces se aplicarán los requisitos de la más exigente a no ser que las zonas habitadas estuvieran aisladas de acorde a la norma EN 378.
 - Clasificación de los emplazamientos:
 - **Clase I:** sistemas de refrigeración con partes que contienen refrigerante ubicados en un espacio habitado, excepto si se cumplen los requisitos de clase II.
 - **Clase II:** sistemas de refrigeración con todos los compresores y recipientes a presión instalados en una sala de máquinas o al aire libre, excepto si se cumplen los requisitos de clase III.
 - **Clase III:** sistema de refrigeración con todas las partes que contienen refrigerante situados en una sala de máquinas o al aire libre.
 - **Clase IV:** sistemas de refrigeración con todas las partes que contienen refrigerante situadas en una envolvente ventilada.

A continuación, se explican las dos tablas para el cálculo de la carga máxima por toxicidad e inflamabilidad. A estas tablas se entra conociendo la categoría de toxicidad o la clase de inflamabilidad respectivamente, la categoría del local y la clasificación del emplazamiento.

Tabla A – Requisitos de carga límite para los sistemas de refrigeración basados en su toxicidad (Tabla 37)

Hay tres posibles resultados al entrar en la Tabla A. El refrigerante puede no tener restricciones en la carga, puede que haya una carga máxima o puede que haya que calcular la carga como el producto del límite de toxicidad por el volumen del local.

No hay restricción de carga para emplazamientos de clase III.

Para locales de acceso general (A) en emplazamientos de clase I o clase II la carga máxima por toxicidad se calcula como el producto del límite de toxicidad por el volumen del local. En sistemas de absorción con refrigerantes de toxicidad B (por ejemplo, sistemas de absorción con amoníaco) la carga máxima se calcula igual, pero está acotada superiormente a 2.5 kg.

En locales de acceso B o C en emplazamientos de clase II no hay restricción de carga para refrigerantes de toxicidad A. Para los de toxicidad B tampoco hay restricción de carga excepto en los siguientes casos, que está limitada a 25 kg:

- Locales con una densidad de personal mayor de 1 persona por cada 10 m².
- Plantas sótanos o pisos superiores sin salidas de emergencia de locales de acceso B.

En locales de acceso B o C en emplazamiento de clase I los refrigerantes de toxicidad A no tienen restricción excepto en plantas sótano o pisos superiores sin salidas de emergencia, donde la carga máxima se calcula como el producto del límite de toxicidad por el volumen del local. Los refrigerantes de toxicidad B están limitados a 10 kg con las dos siguientes excepciones:

- Plantas sótano o pisos superiores sin salidas de emergencia de locales de acceso B, que se calcula como el producto del límite de toxicidad por el volumen del local.
- Locales de acceso C con una densidad de personal inferior a 1 persona por cada 10 m², que están limitados a 50 kg.

Los sistemas en emplazamientos de clase IV se deben evaluar como si fueses de clase I, II o III en función de la ubicación de la envolvente ventilada.

Tabla B – Requisitos de carga límite para los sistemas de refrigeración basados en su inflamabilidad (Tabla 38)

Los posibles resultados son: carga máxima sin restricciones, carga máxima acotada a un cierto valor, carga máxima calculada como producto del 20% límite inferior de inflamabilidad por el volumen del local y, para

aplicaciones de climatización, una carga calculada a partir de un método alternativo que es más permisivo que el general. Existen unas cotas especiales a la carga máxima por inflamabilidad, que son:

- $m_1 = 4 \cdot \text{LFL}$ [kg/m³]
- $m_2 = 26 \cdot \text{LFL}$ [kg/m³]
- $m_3 = 130 \cdot \text{LFL}$ [kg/m³]

Los valores anteriores se basan en cargas de 150 gramos, 1 kg y 5 kg del propano R-290. Para refrigerantes de clase de inflamabilidad 2L estas cotas se incrementan por 1.5, por lo que los índices para calcular m_1 , m_2 y m_3 son 6, 39 y 195, respectivamente.

Para emplazamientos de clase IV la carga no puede superar la cota m_3 .

Para emplazamientos de clase III no hay límite de carga en refrigerantes de inflamabilidad 2L o 2. Para refrigerantes de inflamabilidad 3 la carga máxima es de 5 kg para locales de acceso A y de 10 kg para locales de acceso B, no habiendo tampoco límite en locales de acceso C.

En emplazamientos de clase I y clase II hay que distinguir las instalaciones de climatización del resto de aplicaciones. En caso de ser de climatización la carga máxima se calcula por el procedimiento particular que se explicará más adelante. El resultado de ese cálculo tiene como cota superior m_2 o el máximo entre m_2 y 1.5 kg en refrigerantes de inflamabilidad 3. Para las aplicaciones distintas a la climatización la carga se calcula como el 20% del producto del LFL por el volumen del local con una cota superior que depende de la categoría de inflamabilidad del refrigerante, de la categoría del local, de otras características del local y de la clase de emplazamiento. Estas restricciones se recogen tabla Tabla 16. La única excepción son los refrigerantes de inflamabilidad 2L en locales de acceso C con una ocupación inferior a 1 persona por cada 10 m² en emplazamientos de clase II, que no tiene restricción de carga.

Tabla 16. Cota superior de la carga máxima por inflamabilidad en emplazamientos de clase I o II en aplicaciones diferentes a la climatización [Rodríguez de Arriba, P.E., 2018].

Inflamabilidad	Local	Emplazamiento	Otros	Límite
2L	A	1 o 2	m_2	
	B	1	m_2	
		2	25 kg	
	C	1	<1 persona/ 10m ²	50 kg
		1	Otros	m_2
		2	>1 persona/ 10m 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

En aplicaciones de climatización se sigue el procedimiento del anexo C.2 de la norma EN 378:2016. La carga máxima se calcula aplicando la ecuación 3-1 en función del LFL del refrigerante, la altura de instalación del

equipo y el área del local:

$$m_{m\acute{a}x} = 2.5 \cdot LFL^{\frac{5}{4}} \cdot h_0 \cdot A^{0.5} \quad (3-1)$$

Donde h_0 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 . Si la carga resulta inferior a m_1 en caso de refrigerantes de inflamabilidad 2 o 3, o $1.5 \cdot m_1$ en refrigerantes de inflamabilidad 2L, entonces la carga máxima será m_1 o $1.5 \cdot m_1$, según corresponda.

Cuando se desconozca la superficie donde va a instalarse el equipo, lo que sería el caso de la venta en grandes superficies comerciales de aparatos de aire acondicionado para viviendas, se deberá dar la superficie mínima del local donde se debe instalar el equipo. Se obtiene despejando de la ecuación anterior:

$$A_{m\acute{i}n} = \frac{m^2}{2.5 \cdot LFL^{\frac{5}{4}} \cdot h_0} \quad (3-2)$$

Para el caso particular de aparatos portátiles de aire acondicionado, que serán compactos y herméticos, la carga máxima deberá cumplir con la ecuación 3-3 o el área mínima donde se instale cumplir con la ecuación 3-4. La carga del equipo debe estar comprendida entre 4 y 8 veces el LFL del refrigerante.

$$m_{m\acute{a}x} = 0.25 \cdot LFL \cdot 2.2 \cdot A \quad (3-3)$$

$$A_{m\acute{i}n} = \frac{m}{0.25 \cdot LFL \cdot 2.2} \quad (3-4)$$

Anexo C.3: Alternativas para la gestión de riesgos de los sistemas de refrigeración en zonas habitadas

Se permite un procedimiento simplificado para el cálculo de la carga máxima en sistemas de emplazamiento clase II que utilicen refrigerantes de clase de seguridad A1 o A2L. Otras condiciones que deben cumplir estos sistemas son:

- La capacidad de enfriamiento (calefacción) de la unidad interior no supera el 25% de la capacidad de enfriamiento (calefacción) de la unidad exterior.
- La unidad interior está protegida frente a la formación de hielo y la rotura del ventilador.
- Solo se utilizan uniones permanentes en el espacio habitado, excepto las uniones que conecten la UI con las tuberías.

Se introducen dos nuevos parámetros que evalúan la concentración máxima de refrigerante en un local:

- QLMV (Quantity Limit with Minimum Ventilation) es la concentración de refrigerante que daría lugar a una concentración igual al RCL en un local no hermético considerando los efectos de las infiltraciones que ocurren a través de la puerta del local. Para su cálculo consultar la norma EN 378:2016.
- QLMA (Quantity Limit with Additional Ventilation) es la concentración de refrigerante en el aire que genera una situación instantánea de peligrosidad. Se determina como el mínimo entre el ODL y el 50% del LFL (excepto en el CO_2 que se calcula como la concentración volumétrica del 10% debido a su efecto anestésico agudo).

Evidentemente, el RCL es inferior al QLMV y este, inferior al QLMA. Este procedimiento alternativo propone calcular la carga máxima de refrigerante como el producto del volumen del local por alguno de los límites anteriores. Se permitirá usar el QLMV o el QLMA en el cálculo si se toman medidas de protección adicionales. Se proponen tres medidas de protección adicionales: ventilación, válvulas de cierre y alarma de seguridad.

Con respecto a la ventilación, se necesitan aberturas de renovación mediante convección natural tanto en la parte superior como inferior. La suma del área de estas aberturas debe cumplir con la ecuación 3-5. En el caso de ventilación forzada el caudal de aire debe cumplir con la ecuación 3-6, donde 10 representa la tasa máxima de fuga esperada en kg/g. La abertura inferior debe situarse a menos de 0.2 m del suelo.

$$A = \frac{0.032 \cdot m}{QLMV \cdot V} \quad (3-5)$$

$$Q = \frac{10}{RCL} \quad (3-6)$$

Las válvulas de cierre para seguridad son una medida preventiva que aíslan el circuito frigorífico del local donde ha ocurrido la fuga para asegurar que la concentración en dicho local sea inferior al QLMV. En plantas sótanos se utiliza el RCL. Las válvulas de cierre deben estar ubicadas fuera del espacio ocupado y ser accesibles para el mantenimiento.

Por último, la instalación de una alarma de seguridad debe avisar de una fuga de refrigerante. La alimentación eléctrica de la alarma deberá ser independiente de la ventilación mecánica u otros sistemas de refrigeración que se estén protegiendo, por ejemplo, usando un sistema de reserva. La alarma deberá avisar, al menos, a los ocupantes del espacio donde ha ocurrido la fuga. En el caso de ser un local de categoría A también se deberá advertir a un lugar supervisado, tal como un portero nocturno.

La carga máxima se calcula según el procedimiento siguiente, diferenciando entre plantas sótano y el resto. La carga máxima excepto en plantas sótano es de 150 kg para refrigerantes de clase A1 y $1.5 \cdot m_3$ (en torno a 58.5 kg) para refrigerantes de clase A2L.

- 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 condiciones constructivas que deben cumplir estas instalaciones lo hacen especialmente adecuado para proyectos de climatización con sistemas VRF.

Comparación de los diferentes métodos de carga para un sistema de climatización Split de R-32

Se va a comparar la carga máxima permitida para una aplicación de confort térmico usando R-32 en un aparato Split en una vivienda. El emplazamiento es tipo II y la categoría del local es acceso A. La carga de R-32 estará claramente limitada por su inflamabilidad.

En primer lugar, la carga mínima es m_1 que para el R-32 son 1.84 kg.

Por el procedimiento del anexo C.2., la carga se calcula en función del área del local usando la ecuación (3-1), con una cota superior de m_2 igual a 11.94 kg.

Para las instalaciones que cumplen las condiciones del anexo C.3., lo que requiere una planificación de la construcción, la carga se calcula como el producto del volumen del local por el QLMV (0.063 kg/m^3). Si además se instala una medida adicional, la carga se calcula como el producto del QLAV (0.153 kg/m^3) por el volumen del local. Si hay dos medidas adicionales, es directamente el límite máximo m_3 de 59.72 kg. Para el volumen del local se supone una altura de 3 m.

Para cargas superiores a 59.72 kg es necesario emplear sistemas indirectos como enfriadoras de agua.

Los resultados se muestran en la Figura 9. La utilidad de esta figura es determinar si se necesitan o no medidas adicionales para instalar un sistemas de carga conocida en un local de área acondicionada también conocida. El procedimiento alternativo sin medidas adicionales permite más carga que el convencional a partir de los 30 m^2 . Sin medidas adicionales la carga máxima que puede conseguirse es de 47.25 kg, pues este procedimiento no permite usar áreas de cálculo superiores a 250 m^2 . El procedimiento con una medida adicional es siempre más favorable que los dos métodos anteriores. Se alcanza la carga máxima permitida de 59.72 kg para un área acondicionada de 140 m^2 . Por tanto, instalar dos medidas adicionales solo interesa por debajo de 140 m^2 .

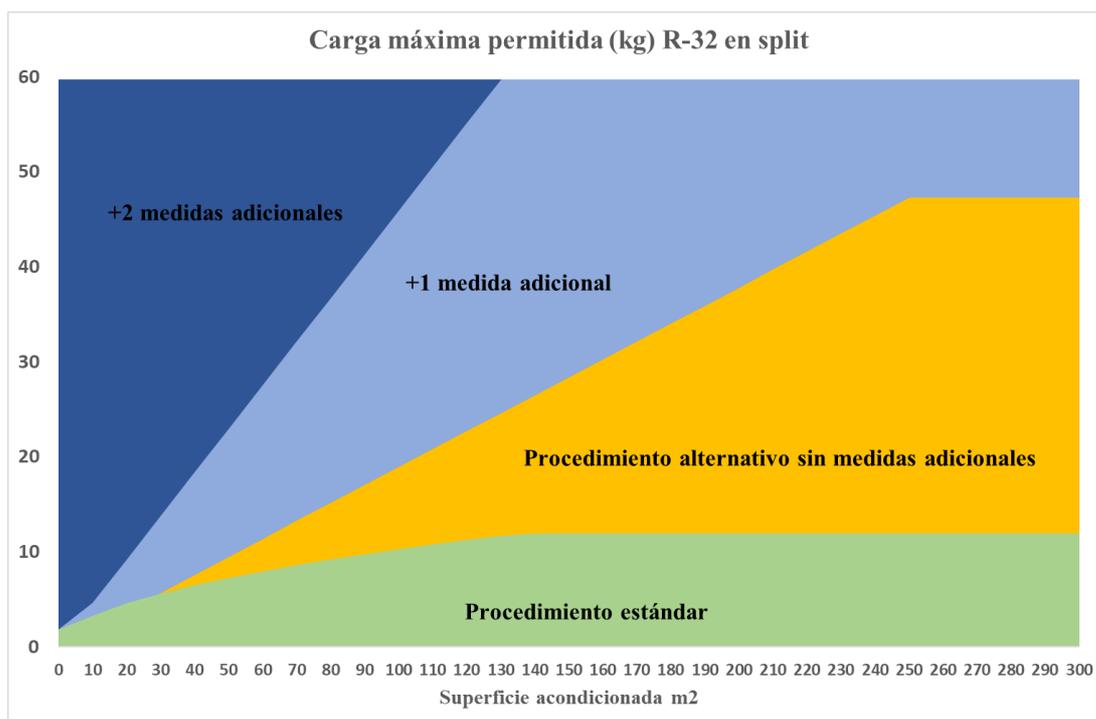


Figura 9. Comparación de la carga máxima permitida para un aparato de aire acondicionado Split con R-32 en una vivienda por el procedimiento estándar y el procedimiento alternativo

3.2.1 Real Decreto 552/2019

El Reglamento de Seguridad para Instalaciones Frigoríficas (RSIF) en España se actualizó el 27 de septiembre de 2019 mediante el Real Decreto 552/2019. El anterior Reglamento, del Real Decreto 138/2011, tan solo permitía el uso de refrigerantes de alta seguridad, que paradójicamente son los más contaminantes desde el punto de vista medioambiental. Por tanto, era necesario un nuevo marco legislativo que permitiese conciliar la seguridad de las instalaciones con las exigencias del Reglamento Europeo 517/2014 en cuanto al abandono de los HFC de alto GWP. Este Real Decreto 552/2019 adapta la norma EN 378:2016, que permite cargas máximas superiores para los refrigerantes diferentes del grupo de seguridad A1. Los refrigerantes más beneficiados son, sin lugar a duda, los pertenecientes a la nueva categoría A2L, pero también se aprecia cierta mejoría en los requisitos exigidos a, por ejemplo, los hidrocarburos (clase A3).

En el artículo 2 del Reglamento se establecen unas cargas mínimas por debajo de las cuales los sistemas frigoríficos están exentos de cumplir el Reglamento. Estos mínimos son:

- 2.5 kg para refrigerantes del grupo L1
- 6·LFL (en torno a 1.8 kg) para refrigerantes de clase A2L
- 0.5 kg para el resto de los refrigerantes del grupo L2
- 0.5 kg para refrigerantes del grupo L3

Además de la mejora de los refrigerantes de clase A2L, que en el anterior Reglamento estaban limitados a 0.5 kg, también es de apreciar el aumento de 0.2 kg a 0.5 kg en los refrigerantes del grupo L3. De hecho, en el proyecto de Real Decreto analizado en mi TFG el mínimo propuesto para estos refrigerantes fue de 0.15 kg, menor incluso que en el RSIF de 2011.

Los límites anteriores también son de aplicación para cualquier equipo no compacto, aunque en estos casos sí hay que presentar cierta documentación indicada en el artículo 21.6 del Reglamento. Esta documentación es un certificado de la instalación frigorífica (conforme al modelo de la IF-10) y un manual de instrucciones.

Además, si el sistema requiere de instalación, ésta deberá cumplir con los requisitos que se establecen para

instalaciones de Nivel 1 o Nivel 2, según corresponda.

Las instalaciones de Nivel 1 son aquellas en las que se emplean refrigerantes de alta seguridad (grupo L1). En sistemas no compactos la potencia instalada de cada compresor no puede superar los 30 kW y el total debe ser inferior a 100 kW. En sistemas compactos no hay limitación de potencia para enfriadoras de agua, enfriadoras de fluidos secundarios o bombas de calor. Una instalación de Nivel 1 tan solo requiere la redacción de una memoria técnica descriptiva. Estas obras pueden ser llevadas a cabo por empresas frigoristas de Nivel 1, a las cuales se les exige tener en plantilla al menos a un instalador frigoristas habilitado para operar estas instalaciones y un seguro de responsabilidad civil profesional de 300 000 euros.

Las instalaciones de Nivel 2 son aquellas que no cumplen las condiciones anteriores, bien porque se superan los requisitos de potencia o porque emplean refrigerantes de media o baja seguridad. Una instalación de Nivel 2 requiere de la redacción de un proyecto técnico y ejecutarse bajo la supervisión de un técnico titulado competente. Estas obras tienen que ser ejecutadas por empresas frigoristas de Nivel 2, a las cuales se les exige tener a un técnico titulado y un seguro de responsabilidad civil profesional de 900 000 euros. Además, el titular de la instalación debe contratar un seguro de responsabilidad civil de 500 000 euros.

Con anterioridad a este Reglamento, se aprobó el Real Decreto – ley 20/2018 en el que se relajan las condiciones de las instalaciones con refrigerantes del grupo A2L. Estos requisitos se han mantenido en el nuevo RSIF. Las instalaciones que emplean estos refrigerantes y cuya potencia eléctrica instalada en cada compresor no superen los 30 kW o la suma total de potencia no supere los 100 kW, podrán ser ejecutadas por empresas frigoristas de Nivel 1, siempre y cuando los operarios estén formados en la manipulación de gases refrigerantes A2L. Esto significa que se elimina la prohibitiva condición al titular de contratar el seguro de responsabilidad civil de 500 000 euros y que no se exige la redacción de un proyecto sino la de una memoria técnica descriptiva. Se permite para estas instalaciones superar las cargas máximas por toxicidad o inflamabilidad siempre que se haga un análisis de riesgo de acuerdo con la normativa ATEX, aunque en ese caso la instalación sí tendría que hacerla una empresa instaladora de nivel 2.

En el caso particular de equipos compactos para sistemas indirectos que utilicen un refrigerante de los grupos L2 o L3 y agua en el secundario, la IF-20 permite que la instalación se realice conforme a los requisitos de una instalación de Nivel 1 y el mantenimiento por una empresa de frigorista de Nivel 2 si se cumplen ciertos requisitos. La condición más importante es que no se manipule el circuito frigorífico. Además, la carga del equipo debe ser inferior a 70 kg si se instalan en una zona de acceso restringido o 5 kg si se instalan en una sala de máquinas específica. Esto es especialmente interesante para enfriadoras de agua en edificios que se instalen en las azoteas con acceso restringido.

Otra particularidad de este Real Decreto es que da un plazo de tres años para legalizar aquellas instalaciones existentes que no lo estuvieran. La razón de esta disposición transitoria es que la Administración es consciente de que el Reglamento Europeo F-Gas forzó a muchos instaladores a construir sistemas con refrigerantes ligeramente inflamables sin cumplir con las estrictas exigencias del desfasado RSIF de 2011. Además, es una necesidad para la Administración conocer cuál es el parque de instalaciones frigoríficas real en nuestro país, por ejemplo, para comunicar las emisiones de gases fluorados de efecto invernadero. Para legalizar una instalación tan solo hay que presentar la declaración responsable del titular y el informe técnico de la instalación. Evidentemente, el titular que cumpla con los requisitos del nuevo Reglamento no se enfrenta a sanciones administrativas.

Este último comentario no es despreciable, puesto que el régimen sancionador que aplica a este Reglamento es el de la Ley de Industrias 21/92. Por tanto, las infracciones leves son de 60 000 €, las graves de 6 000 000€ y las muy graves de 100 000 000€. En otras palabras, el incumplimiento de cualquier punto del RSIF conlleva un riesgo elevadísimo.

Por ejemplo, hay que cumplir con los requisitos de la IF-17 en cuanto a control de fugas. Realmente, esta IF ya está en vigor desde el RD 115/2017. Lo que se pretende es minimizar las emisiones directas de refrigerante fluorados a la atmósfera. No hay que revisar los sistemas frigoríficos de menos de 5 toneladas equivalentes de CO₂ o 10 toneladas equivalentes si son sistemas herméticamente sellados. Hasta las 50 toneladas la revisión será cada 12 meses, entre 50 y 500 toneladas CO₂ la revisión es cada 6 meses y, si se superan las 500 toneladas, entonces la revisión será cada 3 meses. El tiempo entre revisiones de las revisiones se duplica si se cuenta con un sistema de detección de fugas que, de hecho, son obligatorios en sistemas de más de 500 toneladas equivalentes de CO₂. Se deberán subsanar las fugas detectadas lo antes posible.

Por otro lado, la IF-14 regula el mantenimiento y las inspecciones de las instalaciones periódicas. El titular tiene la obligación de contratar una empresa frigorista para realizar un mantenimiento preventivo de acuerdo con el manual de uso de la instalación. En el caso de instalaciones de climatización, el RITE es más exigente que esta IF-14 con respecto al mantenimiento.

3.2.2 La aplicación de la norma EN 378 a otras legislaciones nacionales europeas

Como se ha comentado, la norma técnica EN 378 es la referencia de la que emanan todos los Reglamentos nacionales sobre instalaciones frigoríficas en la Unión Europea. Por tanto, el procedimiento de cálculo de la carga máxima de refrigeración es el descrito en el apartado 3.2. No obstante, siguen existiendo matices importantes entre todos estos Reglamentos nacionales. Por ejemplo, la carga mínima fijada en el ámbito de aplicación. Este límite es muy importante en pequeños equipos compactos y semicompactos, donde suele ser muy permisivo en comparación con los resultados obtenidos por el procedimiento general de cálculo de la carga máxima, pues de este límite depende que el Reglamento imponga o no barreras adicionales a la utilización de los refrigerantes alternativos en estos aparatos.

Se estudia el caso de Francia, Alemania, Italia, Bélgica, Austria y Reino Unido. Para este análisis se ha partido del *report* elaborado por *Ricardo Energy & Environment* para la Comisión Europea (2015).

3.2.2.1 Francia

Las instalaciones frigoríficas de climatización y producción de ACS están reguladas por el decreto de 25 de junio de 1980 apartado CH 35. Este reglamento fue actualizado en mayo de 2019 para permitir el uso de refrigerantes A2L en aplicaciones de climatización.

Para los refrigerantes inflamables empleados en aplicaciones de confort humano y producción de ACS, se simplifica el procedimiento de cálculo de la carga máxima de la norma EN 378:2016 de manera que la carga se determina siempre con la ecuación 3-1. No hay restricción de carga si se incluyen válvulas de cierre y un sistema de ventilación que evite que se alcance el LFL en el local. Tampoco hay limitación de carga si el equipo se instala en una sala de máquinas o al aire libre. Esta modificación permite el uso de los refrigerantes de clase A2L y A2, que en la versión anterior solo podían utilizarse en sistemas indirectos, ubicados al aire libre o en una sala de máquinas y con cargas inferiores a 150 kg, y también el uso de los hidrocarburos (clase A3), que en la anterior versión estaban prohibidos.

Los refrigerantes tóxicos, es decir, de clase de toxicidad B, solo pueden utilizarse en sistemas indirectos, ubicados al aire libre o en una sala de máquinas y con una carga inferior a 150 kg.

La versión anterior de esta CH 35 sí afectaba a los sistemas de refrigeración, estableciendo que en sistemas directos tan solo podían utilizarse refrigerantes de seguridad A1. En estos casos la carga se calculaba como el producto del RCL por el volumen del local. A no ser que se sitúen en una sala de máquinas o al exterior, en cuyo caso no habría limitación de carga. En general, se hacía referencia continua a la norma EN 378.

3.2.2.2 Alemania

El Reglamento de Instalaciones Frigoríficas se encuentra en la sección 2.35 del DGUV 100-500. En general, aplican las definiciones y requisitos de la norma europea EN 378. Se destacan unos límites mínimos bastante elevados. Estos límites son 10 kg para refrigerante del grupo L1 (convencionales), 2.5 kg para aquellos del grupo L2 (R-32, R-1234yf, R-1234ze o amoniaco) y 1 kg para refrigerantes del grupo L3 (hidrocarburos).

Por tanto, las barreras se encuentran en los estándares que sigan los fabricantes de equipos, que suelen ser las normas EN 378 para las instalaciones en general y las EN 60335 para productos en particular.

3.2.2.3 Italia

En Italia las instalaciones de refrigeración y climatización están reguladas por diferentes decretos ministeriales según el tipo de ubicación.

En todos ellos estaba prohibido usar refrigerantes inflamables o tóxicos, y por tanto solo podrían usarse refrigerantes del grupo de seguridad L1 y no sería posible una instalación con refrigerantes alternativos. Si se

permite el uso del amoníaco en chillers para sistemas indirectos [Comisión Europea, 2015].

Aun así, a partir de 2015 han ocurrido cambios en esta legislación de protección contra incendios para permitir los refrigerantes clasificados como A2L. Al igual que en otras normativas están fuera de la regulación las instalaciones de menor tamaño, pero en lugar de clasificarlas por la cantidad de refrigerante según el grupo de seguridad, se distingue según el tamaño del edificio en el que se instalan. Por ejemplo, las instalaciones en hoteles con menos de 25 camas o en escuelas con menos de 100 alumnos no están reguladas y sí podría usarse en ellas refrigerantes alternativos como el R-32. En cambio, el decreto del 23 de noviembre de 2018 que regula los locales comerciales de más de 400 m² permite, por primera vez, el uso de refrigerantes de clase A2L en iguales condiciones que los de clase A1 [Teknologie impianti. 2019].

3.2.2.4 Bélgica

La situación de Bélgica es compleja debido a que está dividida en tres regiones con poder legislativo y, a su vez, cada municipio puede establecer variaciones en prevención contra incendios, lo que afectaría a los refrigerantes inflamables. Esto ocasiona problemas a los proveedores de equipos de RACHP, dado que los requisitos exigidos no son consistentes en todo el país.

En la Región Flamenca la legislación más general de las instalaciones frigoríficas es la VLAREM II, Arkitel 5.16.3.3. En este Reglamento se insta a seguir la norma EN-378 excepto si la instalación tiene menos de 10 kg de refrigerante L1, 2.5 kg de refrigerante L2 o 1 kg de refrigerante L3, en cuyo caso no es necesario.

La Región de Bruselas-Capital sigue la Belgisch Staatsblad del 29 de noviembre 2018 *Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale relatif aux conditions d'exploitation des installations de réfrigération*. Anteriormente, el Reglamento en vigor era el del 19 de junio de 2012. Este último decreto armoniza con las condiciones del Reglamento Europeo 517/2014 en cuanto a control de fugas, entre otros, pero no añade restricciones adicionales a la norma EN 378:2016.

Por su parte, en la Región Valona se emplean dos leyes, ambas del 12 de julio de 2017, la *Arrêté du Gouvernement wallon déterminant les conditions intégrales et sectorielles relatives aux installations fixes de production de froid ou de chaleur mettant en oeuvre un cycle frigorifique* y la *Arrêté du Gouvernement wallon tendant à prévenir la pollution lors de l'installation et la mise en service des équipements frigorifiques fixes contenant de l'agent réfrigérant fluoré, ainsi qu'en cas d'intervention sur ces équipements, et à assurer la performance énergétique des systèmes de climatisation*, habiendo sido esta última modificada varias veces. Igual que en los casos anteriores, para el cálculo de la carga máxima se insta a seguir la norma europea.

La legislación nacional más importante de las instalaciones frigoríficas es la VLAREM II, Arkitel 5.16.3.3. En este Reglamento se insta a seguir la norma EN-378 excepto si la instalación tiene menos de 10 kg de refrigerante L1, 2.5 kg de refrigerante L2 o 1 kg de refrigerante L3, en cuyo caso no es necesario.

3.2.2.5 Austria

Las plantas frigoríficas están reguladas por la ordenanza BGBl n°305/1969, aunque no se aplica si la cantidad de refrigerante es inferior a 1.5 kg sea cual sea la categoría del fluido. Se clasifican los refrigerantes sin incluir la categoría de inflamabilidad A2L.

En los espacios habitables tan solo se permiten los del grupo 1 o el amoníaco con un máximo de 50 kg si se tiene permiso por la autoridad local. No se necesita instalar el equipo frigorífico en una sala de máquinas o al aire libre si la carga es inferior a 150 kg para refrigerantes del grupo 1 o 10 kg para el amoníaco. Los refrigerantes de los grupos 2 y 3 no pueden instalarse en sótanos. Se entiende que los refrigerantes del grupo 2 y 3, excepto el amoníaco, siempre deben instalarse en una sala de máquinas especial.

En sistemas directo se pueden instalar cualquier cantidad de refrigerantes del grupo 1 siempre que se cumplan con los límites prácticos. En el caso de refrigerantes del grupo 2 la cantidad está limitada a 50 kg y para refrigerantes del grupo 3 está limitada a 25 kg. Para aires acondicionados en viviendas están prohibidos los refrigerantes de los grupos 2 o 3, lo cual supone un veto al R-32, que está llamado a ser la alternativa a los refrigerantes convencionales en estas aplicaciones.

El mínimo de 1.5 kg permite el uso de los refrigerantes alternativos en pequeños equipos compactos de

refrigeración doméstica, refrigeración comercial y climatización. En estos casos se sigue la norma EN 378:2016 y los estándares verticales de la serie EN 60335.

3.2.2.6 Reino Unido

Los fluidos refrigerantes, por ser fluidos presurizados, están regulados por la *Dangerous Substances and Explosive Atmospheres Regulations (DSEAR)* que no es más que la implementación de la directiva ATEX en Reino Unido. Desde FETA (*Federation of Environmental Trade Associations*) se están haciendo esfuerzos para desarrollar una reglamentación particular de los fluidos refrigerantes que esté en consonancia con la DSEAR, sobre todo para los refrigerantes de clase A2L. Su propósito es desarrollar guías que permitan diseñar instalaciones de refrigeración que cumplan la evaluación de riesgos exigidas por la DSEAR. Se toma como referencia la norma europea EN 378, por lo que las cargas de refrigerante se calculan de acuerdo con el procedimiento general explicado anteriormente.

3.3 Norma ASHRAE 15:2019

El ASHRAE 15 es el estándar de buenas prácticas para diseño, construcción, instalación y operación de sistemas de refrigeración en los Estados Unidos. La versión actual es la del año 2019, que incluyó cambios en los requisitos del R-717, introdujo especificaciones para los refrigerantes A2L y relajó las restricciones a los refrigerantes inflamables en equipos compactos. Con respecto al amoníaco (R-717), el ASHRAE 15 refiere en todo momento a la norma ANSI/IIAR-2 2014 “Standard para el diseño seguro de sistemas de refrigeración en circuito cerrado con amoníaco”.

En el ASHRAE 15 el uso de los refrigerantes se nutre de las clasificaciones al tipo de edificio, tipo de sistema y grupo de seguridad de los refrigerantes.

Según la ubicación se distinguen seis tipos más el caso combinado.

- Edificios de ocupación institucional, se refiere a aquellos edificios donde sus ocupantes no puedan abandonar el lugar sin ayuda, como por ejemplo hospitales, guarderías o prisiones.
- Edificios de afluencia pública, se refiere a aquellos lugares donde pueden acceder un gran número de personas, pero no es posible evacuar rápidamente, como auditorios, escuelas, teatros o restaurantes.
- Edificios residenciales, se refiere a lugares donde sus ocupantes tienen estancias independientes entre ellos. Se incluyen viviendas, hoteles o apartamentos.
- Edificios comerciales, se refiere a lugares donde sus ocupantes compran comidas u otros bienes, reciben atención personal o lleva a cabo cualquier negocio, quedando excluidos los lugares de alta ocupación. Ejemplos serían oficinas, pequeños negocios, mercados o almacenes.
- Grandes superficies comerciales, se refiere a lugares donde se congregan más de 100 personas para comprar y vender mercancías.
- Edificios industriales, se refiere a lugares no abiertos al público, sino que solo se permite acceder a personas autorizadas y donde se llevan a cabo actividades de fabricación o almacenamiento.
- Ocupación mixta, cuando coexisten en un mismo edificio dos o más de las ubicaciones anteriores se debe aplicar al edificio completo los requisitos del espacio más restrictivo, a no ser que cada espacio esté separado de los otros, en cuyo caso se puede aplicar a cada espacio sus requerimientos concretos.

Según el tipo de sistema, se distinguen:

- Sistemas directos: el evaporador o condensador transfiere calor con el medio que se quiere refrigerar o calentar.
- Sistemas indirectos: existe un fluido secundario que hace de intermediario entre el refrigerante y el medio que se quiere enfriar o calentar.
 - Indirecto abierto: el refrigerante secundario se mezcla con el fluido que se quiere enfriar o calentar.
 - Doble indirecto abierto: igual que el anterior, pero añadiendo otro fluido intermedio en ciclo cerrado.

- Indirecto cerrado: el refrigerante secundario enfría o calienta el fluido en un intercambiador en circuito cerrado.
- Indirecto cerrado ventilado: igual que el anterior pero el fluido secundario entra en contacto con el refrigerante primario en un tanque ventilado.

La clasificación anterior se simplifica a tan solo dos tipos de sistemas:

- Sistemas de alta probabilidad, en los que una fuga de refrigerante es muy probable que termine en el espacio ocupado. Se incluyen los sistemas directos y los sistemas indirectos abiertos donde el refrigerante opera a una presión mayor que el fluido secundario.
- Sistemas de baja probabilidad, en los que una fuga de refrigerante no puede terminar en el espacio ocupado. Se incluyen los sistemas indirectos cerrados, doble indirecto e indirecto abierto donde la presión del fluido secundario siempre sea mayor que la del refrigerante.

La manera natural de utilizar el ASHRAE 15 es para comprobar si la carga de la instalación que estamos proyectando nos obliga o no a colocar los equipos en una sala de máquinas o al aire libre. Aun así, en este apartado se describirá cómo utilizar el ASHRAE 15 como un método de cálculo para determinar la carga máxima de refrigerante admisible cuando se conoce de antemano tanto el tipo de edificio donde se va a ubicar como el tipo de sistema.

En primer lugar, nos fijamos si nuestra instalación se incluye en alguno de los casos para los que no hay restricción de carga de refrigerante:

- a) Sistemas de baja probabilidad.
- b) En edificios industriales y cámaras frigoríficas que cumplen con las siguientes características:
 - Los equipos que contienen refrigerante están separados de los espacios ocupados.
 - El acceso está restringido a personas autorizadas.
 - Se instalan detectores de refrigerante de acorde al ASHRAE 15.
 - No hay fuegos ni superficies a más de 426.7°C si se utilizan refrigerantes de los grupos A2, A3, B2 o B3.
 - Todos los elementos que contienen refrigerante en sistemas de más de 74.6 kW excepto el evaporador usado para refrigeración o deshumidificación o condensadores para calentamiento deben estar ubicados en una sala de máquinas específica o al aire libre.
- c) Todas las partes que contienen refrigerante se encuentran al aire libre o en una sala de máquinas que cumple con los requisitos específicos del ASHRAE 15 según la clase de seguridad del refrigerante.
- d) El sistema frigorífico cumple con las características de la tabla inferior y tiene una carga menor que la allí indicada. Estos casos son: (1) es un equipo compacto o semicompactos con carga menor de 3 kg en edificios residenciales, (2) equipo compacto o semicompactos con carga menor a 10 kg en edificios comerciales, y (3) equipos de absorción de amoníaco con carga no superior según lo indicado en la tabla.

Table 7-1 Special Quantity Limits for Sealed Ammonia/Water Absorption and Self-Contained Systems

Type of Refrigeration System	Maximum lb (kg) for Various Occupancies			
	Institutional	Public/Large Mercantile	Residential	Commercial
Sealed Ammonia/Water Absorption System				
In public hallways or lobbies	0 (0)	0 (0)	3.3 (1.5)	3.3 (1.5)
In adjacent outdoor locations	0 (0)	0 (0)	22 (10)	22 (10)
In other than public hallways or lobbies	0 (0)	6.6 (3)	6.6 (3)	22 (10)
Unit Systems				
In other than public hallways or lobbies	0 (0)	0 (0)	6.6 (3)	22 (10)

Si no se cumplen ninguna de las condiciones anteriores, entonces nuestro sistema es de alta probabilidad. En estos sistemas la concentración de refrigerante, suponiendo una descarga completa de cada circuito

independiente, no debe superar el RCL establecido para ese refrigerante según el ASHRAE 34. A esto se le llamará de ahora en adelante requisito 7.2 (en consonancia con el artículo del ASHRAE 15 donde se establece), en referencia al apartado del standard en el que se establece. El límite 7.2 se reduce al 50% en edificios de uso institucional.

Hay dos excepciones al requisito 7.2: equipos autorizados por un laboratorio aprobado que (1) tengan una carga inferior a 3 kg sea cual sea el refrigerante que usen o (2) de cualquier carga para ser usados en laboratorios donde la ocupación es inferior a una persona por cada 9.3 m². Estos equipos autorizados por laboratorios se llaman en este standard “listed equipments”. Son equipos incluidos en una lista publicada por laboratorios aprobados por la autoridad competente.

Si es una aplicación de confort humano los refrigerantes de los grupos B1, A2, B2L, B2, A3 y B3 están prohibidos. Los refrigerantes A2L en sistemas de alta probabilidad deben cumplir con el requisito 7.2 así como con una serie de requisitos de seguridad adicionales como ser instalados siguiendo las indicaciones del fabricante, debe indicarse que usa un refrigerante inflamable, se debe instalar un detector de fugas y alguna medida de seguridad cuando se detecte una fuga significativa.

Aunque los sistemas de baja probabilidad no tienen restricciones a la carga máxima de refrigerante admisible, si tienen que cumplir los siguientes requisitos que son también aplicables para los sistemas de alta probabilidad: (1) el total de refrigerantes inflamables (A2, A3, B2 y B3) no pueden superar los 250 kg en edificios de uso institucional y 500 kg en cualquier otro; y (2) siempre que se quieran usar refrigerantes de los grupos A3 y B3 es necesario contar con la aprobación de la autoridad local a no ser que la carga sea igual o inferior a 150 g en equipos compactos o semicompactos, o si se instalan en edificios industriales o en laboratorios con un espacio disponible mínimo de 9.3 m² por persona.

3.3.1 International Building Code (IBC)

El International Building Code (IBC) es un código de edificación desarrollado por el International Code Council (ICC) con ánimo de servir de base para los códigos de edificación de los diferentes Estados de los Estados Unidos y así homogeneizar la legislación en todo el territorio.

Los sistemas de refrigeración están regulados en el capítulo 11 del International Mechanical Code (IMC, 2018). Se observa que este código está muy armonizado con el ASHRAE 15. En este sentido la clasificación de los locales en función de su ocupación y de los sistemas es idéntica. A pesar de ser publicada su última versión en 2018, y se revisan cada tres años, sí aparece la clasificación A2L y B2L.

La carga máxima de refrigerante no puede superar el RCL excepto en las instalaciones de uso institucional que será el 50% del RCL. En caso de excederse la instalación deberá ir en una sala de máquinas o al aire libre. Están exentos de cumplir este límite los equipos compactos autorizados (listed equipment) de 3 kg. En el ASHRAE 15 también quedaban exentos los equipos compactos para pequeños comercios de hasta 10 kg y los de 3 kg en edificios residenciales, aunque no fuesen aparatos autorizados, pero esto no aparece en el IMC ya que este contenido pertenece a la versión de 2019 de la norma ASHRAE, siendo el código de edificación anterior.

Encontramos una diferencia significativa en las aplicaciones de confort humano. Mientras que en el ASHRAE 15 solo se permiten los refrigerantes de los grupos A1 y A2L, en el IMC también se permiten los de clase A2 y A3.

Los sistemas de baja probabilidad no tienen restricción en la carga máxima excepto que la carga total de refrigerantes de A2, A2L, A3, B2, B2L y B3 no puede superar los 500 kg o 250 kg en edificios de ocupación institucional. Esto es ligeramente más restrictivo que el ASHRAE 15, donde no se incluyen los refrigerantes de clase A2L y B2L.

Al igual que en el ASHRAE 15, los refrigerantes de las clases A3 y B3 no están permitidos en instalaciones no industriales excepto si lo permite la autoridad local.

3.4 Estándares verticales

En este apartado se comentan las principales restricciones que las normas técnicas de equipos establecen en Europa y Estados Unidos. Se diferencia por aplicación en refrigeración doméstica, refrigeración comercial y

climatización.

Estos estándares son especialmente importantes porque pueden añadir limitaciones adicionales a los estándares horizontales, sobre todo para los hidrocarburos. Para estos, estas normas establecen una carga máxima en los equipos a los que aplica (ver Tabla 17).

Tabla 17. Comparación de la carga máxima permitida en hidrocarburos para los principales estándares verticales

Aplicación	IEC	EN	UL
Refrigeración doméstica	150 g	150 g	150 g
Refrigeración comercial	500 g (última versión de 2019)	150 g	150 g
Climatización	5 kg enfriadoras, 1 kg en Split y 0.3 kg en A/C portátiles	5 kg enfriadoras, 1 kg en Split y 0.3 kg en A/C portátiles	115 g máximo

3.4.1 Refrigeración doméstica

En Europa, la norma EN 60335-2-24 aplica a frigoríficos y congeladores domésticos. La última versión de esta norma reconoce a los refrigerantes A2L, aunque no les da ninguna ventaja con respecto al resto de refrigerante inflamables de las clases A2 y A3. No hay refrigerantes prohibidos, pero la carga máxima de refrigerantes inflamables está limitada a 150 gramos. El R-744 en ciclos transcíticos está permitido sin límite de carga.

En Estados Unidos, la norma que aplica a estos aparatos compactos es la UL 60335-2-24. Hasta 2017 la norma en vigor era la UL 250 que limitaba la carga de los refrigerantes de clase A2, incluyendo A2L, a 225 gramos y la carga de refrigerantes A3 a 57 gramos. Ahora, con la adopción de la UL 60335-2-24 se incrementa la carga de los refrigerantes A3 a hasta 150 gramos [Underwriters Laboratories, 2017].

3.4.2 Refrigeración comercial

En Europa, la norma EN 60335-2-89 regula equipos compactos que incluyen el compresor y el condensador como son los frigoríficos y congeladores comerciales, y también aplica a equipos partidos como son las unidades condensadoras. La carga de los refrigerantes inflamables no puede ser superior a 150 gramos.

En Estados Unidos, la norma de aplicación para estos equipos de refrigeración comercial es la UL 741, aunque está en proceso de ser reemplazada por la norma UL 60335-2-89. Se permiten cargas de hasta 500 gramos para refrigerantes de clase A2 y de 150 gramos para los hidrocarburos (clase A3) [Underwriters Laboratories, 2017].

No obstante, hay que mencionar que la actual versión de la norma IEC 60335-2-89, aprobada en junio de 2019, eleva la carga permitida a 500 gramos para refrigerantes de clase A3 como son los hidrocarburos y a 1.2 kg para los refrigerantes A2L y A2. Es de esperar que en los próximos años los estándares europeos y estadounidenses se armonicen con el de IEC [Life Front, 2018].

3.4.3 Climatización

En Europa, la norma EN 60335-2-40 aplica a aparatos de A/C y bombas de calor para climatización, pero también bombas de calor para ACS y enfriadoras de agua (chillers) empleadas en climatización. La carga máxima se calcula según el anexo GG, en el que intervienen las ecuaciones (3-1) y (3-3) explicadas anteriormente. Se puede deducir que para aparatos partidos de A/C la carga está limitada a aproximadamente 1 kg para los hidrocarburos, mientras que para aparatos portátiles de A/C es de 0.3 kg. Estos límites se corresponden con m_2 y $2 \cdot m_1$, es decir, $26 \cdot LFL$ y $8 \cdot LFL$, respectivamente. Para enfriadoras de agua se permite alcanzar el límite m_3 , que es aproximadamente de 5 kg para los hidrocarburos.

En Estados Unidos, la norma UL 484 para A/C en viviendas tan solo permite 3·LFL kg tanto de refrigerantes de clase A2 como de A3. Esto supone apenas 115 gramos de R-290. Este bajo límite se debe a que los refrigerantes A2 y A3 no están permitidos para aplicaciones de climatización en Estados Unidos. Se está trabajando para sustituir la norma UL 484 por la UL 60335-2-40, que está armonizada con la IEC 60335-2-40. Esto significa que se permitirían hasta 26·LFL kg en aparatos de A/C y 130·LFL kg en sistemas indirectos como chiller. Actualmente, la última modificación del ASHRAE 15 sí permite el uso de refrigerantes de clase A2L en A/C, pero los hidrocarburos siguen prohibidos tanto en A/C como en enfriadoras de agua de sistemas centralizados [Underwriters Laboratories, 2017].

4 ENCAJE DE LOS NUEVOS REFRIGERANTES EN LA NORMATIVA INTERNACIONAL

Es evidente que los refrigerantes HFCs que se usan actualmente van a tener que ser reemplazados por otros que tengan un menor potencial de calentamiento atmosférico. La transición será mucho más compleja que la que ocurrió para sustituir los CFCs por los HCFCs y, con posterioridad, éstos por los HFCs. La razón es que los refrigerantes CFCs, HCFCs y HFCs tienen propiedades similares y muy favorables desde el punto de vista de seguridad de las instalaciones. No puede decirse, sin embargo, lo mismo de los refrigerantes HFCs de bajo GWP, los refrigerantes naturales y las olefinas (HFOs).

Esto se ilustra en la Figura 10, donde se muestra para los principales refrigerantes (Tabla 36) el GWP frente al RCL. Se agrupan los refrigerantes en cuatro categorías:

- HFCs convencionales,
- HFCs de bajo GWP,
- refrigerantes naturales y
- refrigerantes HFOs.

Interesan aquellos refrigerantes que se encuentren lo más próximo posible a la esquina inferior derecha, es decir, los que tengan un bajo GWP y un alto RCL. Sin embargo, se intuye una relación lineal entre el GWP y el RCL. Esto significa que cuánto menos contaminante es un refrigerante, más peligroso resulta.

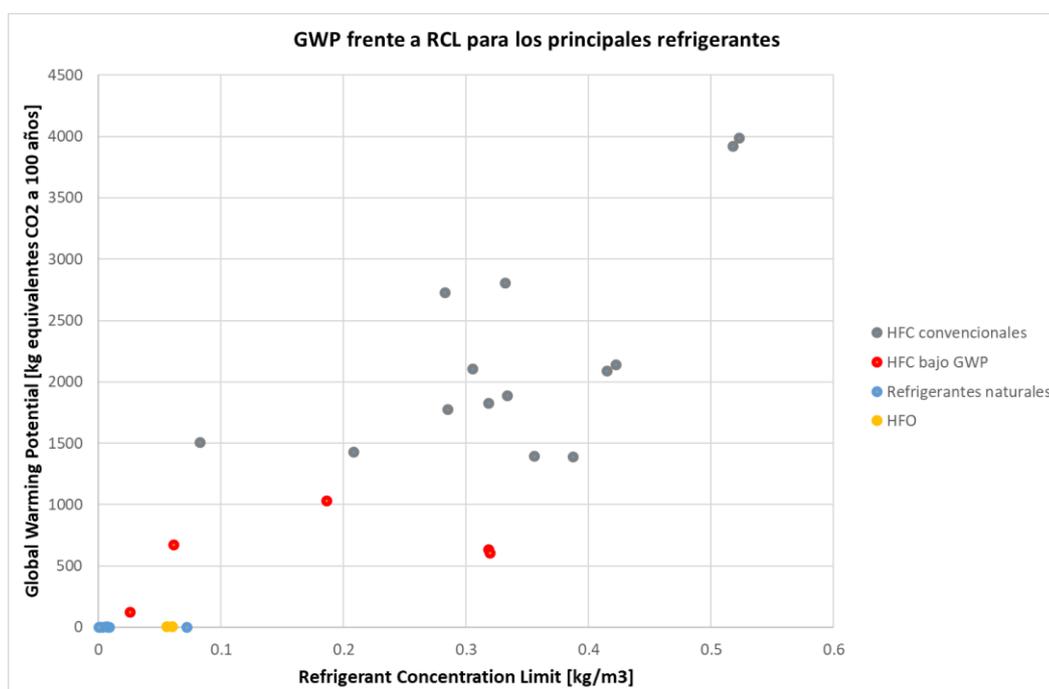


Figura 10. Relación entre el GWP y el RCL para los principales refrigerantes

Los HFCs convencionales tienen GWP superiores a 1500 y, generalmente, RCL mayores a 0.3 kg/m³, aunque excepcionalmente encontramos algunos como el R-426A que tiene un RCL bajo de 0.083 kg/m³ o el R-134a, cuyo RCL es 0.21 kg/m³.

Por su parte, los HFC de bajo GWP tienen un impacto sobre el calentamiento atmosférico entre 124 y 1030 kg

equivalentes de CO₂. Su RCL se encuentra en un amplio rango desde los 0.025 kg/m³ (correspondiente al R-152a cuyo GWP es 124) hasta los 0.32 kg/m³ (R-513A y R-450A).

Por último, los refrigerantes naturales y los HFOs tienen GWP prácticamente nulo, pero su RCL es inferior a 0.07 kg/m³.

La conclusión de todo esto es que para que esta transición a refrigerantes respetuosos con el medio ambiente sea exitosa será necesario desarrollar:

- Una tecnología preparada para trabajar con pequeñas cargas y minimizar las fugas de refrigerante,
- Estándares horizontales y verticales que garanticen la seguridad en las instalaciones,
- Reglamentos nacionales que no prohíban el uso de refrigerantes por ser tóxicos y/o inflamables y los permitan en cantidades suficientes.

4.1 Casos de estudio

En este capítulo se va a comparar para los principales sistemas de refrigeración y climatización la carga máxima que permiten las normas EN 378:2016 -con los mínimos de carga del artículo 2 del RD 552:2019 de España- y ASHRAE 15 -junto con las indicaciones de la EPA- para una selección de los refrigerantes alternativos. Los casos analizados se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18. Casos de estudio analizados

Sector	Emplazamiento	Sistemas
Refrigeración doméstica	Cocina de 25 m ³	- Frigoríficos y congeladores domésticos
Refrigeración comercial	Pequeño comercio de 150 m ²	- Frigoríficos y congeladores comerciales - Unidades de condensación remota
	Gran superficie comercial	- Unidades de condensación remota - Central frigorífica directa - Central frigorífica en cascada - Central frigorífica indirecta
Refrigeración industrial	Cámara frigorífica	- Sistemas monoblock - Sistemas semicompactos
Climatización	Estancia de 30 m ²	- Equipo portátil de A/C - Equipo partido de A/C
	Pequeño comercio de 150 m ²	- Equipo partido A/C - Sistema Rooftop
	Gran edificio	- Sistema centralizado - Sistema VRF

Para cada caso se estudiarán refrigerantes diferentes, ya que por sus propiedades termodinámicas no todos son aptos para todas las aplicaciones. Se ha hecho una selección de refrigerantes representativos, tanto tradicionales como alternativos (Tabla 19).

Tabla 19. Listado de refrigerantes tradicionales y alternativos clasificados según su aplicación, su clase de seguridad y su GWP

Refrigerante	Aplicación	Categoría	Clase Seguridad	GWP [kg equiv. de CO₂]
R-134a	Cualquiera	HFC convencional	A1	1430
R-404A	Refrigeración comercial	HFC convencional	A1/A1	3922
R-407A	Refrigeración comercial	HFC convencional	A1/A1	2107
R-410A	Chiller y A/C	HFC convencional	A1/A1	2088
R-407C	Chiller y A/C	HFC convencional	A1/A1	1774
R-744	Refrigeración comercial	Natural	A1	1
R-1234ze(E)	Refrigeración doméstica, chiller y A/C	HFO	A2L	7
R-32	A/C y chiller	HFC bajo GWP	A2L	675
R-152a	Refrigeración comercial	HFC bajo GWP	A2	124
R-717	Chiller, refrigeración comercial y refrigeración industrial	Natural	B2L	0
R-600a	Cualquiera	Natural	A3	3
R-290	Cualquiera	Natural	A3	3
R-441A	Refrigeración doméstica	Natural	A3/A3	3.5

La generación actual de refrigerantes son los HFC, que se caracterizan por no tener cloro en su composición y, por tanto, no provocar el agotamiento de la capa de ozono. Su principal aspecto negativo es su alto potencial de calentamiento atmosférico (GWP), que se mueve entre los 1430 kg equivalentes de CO₂ del R-134a hasta los 3922 kg equivalentes de CO₂ del R-404A (Tabla 19). Como ya se ha comentado en apartados anteriores, para reducir el impacto medioambiental de los sistemas frigoríficos conviene, por un lado, emplear refrigerantes de bajo GWP y, por otro, mejorar la eficiencia energética de las instalaciones para minorar el impacto indirecto.

El R-134a es uno de los refrigerantes HFC más empleados, si no el que más, a nivel mundial. Sus características termodinámicas lo hacen muy similar, y por tanto un buen sustituto, al R-12. También para algunas aplicaciones el R-134a era preferible al R-22. Al ser su temperatura de ebullición normal de -26°C (próxima a -29°C para el R-12, pero mucho mayor que los -41°C del R-22), su uso principal es para A/C y refrigeración de media temperatura. Con un GWP relativamente bajo de 1430, el abandono de este refrigerante no se espera hasta medio plazo, siendo incluso un buen candidato a mezclas de bajo GWP [Bitzer, 2018].

El R-404A es una mezcla no azeotrópica formada por un 44% de R-125, 52% de R-143a y 4% de R-134a. En el rango de aplicación habitual el deslizamiento es inferior a 1 K. Era un refrigerante muy extendido en la

refrigeración comercial, como sustituto del R-22, al tener una temperatura de ebullición muy baja de entre -46.5°C y -45.7°C. Sin embargo, su elevadísimo GWP (3922) lo condena a no estar ya permitido en gran parte del mundo. Debido a esto se desarrollaron mezclas con propiedades parecidas al R-404A, pero con menor GWP. Destacamos el R-407A, compuesto por 20% de R-32, un 40% de R-125 y un 40% de R-134a, resultando en un GWP de 2107 kg equivalentes CO₂. El punto de ebullición normal es de -45.2°C a -38.7°C, ligeramente superior al R-404A y con un glide considerable. El calor específico del R-407A también es menor que el del R-404A. Por otro lado, el COP es un 5% superior [Bitzer, 2018].

El R-410A es también una mezcla no azeotrópica formada por un 50% de R-32 y un 50% de R-125, con un deslizamiento o glide de menos de un 1 K. Se emplea fundamentalmente en aplicaciones de climatización. En comparación con el R-22, su capacidad frigorífica volumétrica, expresada en kW/m³/s, es un 50% mayor. Por el contrario, los niveles de presión del R-410A son también superiores. En un principio, el COP es un 5% inferior, pero, en la práctica, es posible conseguir buenos rendimientos isentrópicos en el compresor y, gracias a los altos coeficientes de transferencia, también un diseño óptimo de los intercambiadores de calor. Todo ello permite eficiencias más altas que con cualquier otro refrigerante [Bitzer, 2018].

El R-407C tiene un 23% de R-32, un 25% de R-125 y un 52% de R-134a. Este refrigerante tiene unos niveles de presiones y un COP muy parecido al R-22, siendo un buen sustituto de este en aplicaciones de confort térmico. Su GWP es de 1774, por lo que al igual que al R-134a, su esperanza de vida se extenderá unos años. El principal problema de este refrigerante es el alto deslizamiento de unos 7 K, exigiendo un diseño especial de los intercambiadores de calor y del resto de componentes [Bitzer, 2018].

El amoníaco (R-717) ha sido usado durante más de un siglo en aplicaciones de refrigeración industrial. Sus principales virtudes son su alta eficiencia energética, su bajo coste y su nulo impacto medioambiental. No obstante, también tiene notables desventajas: elevada temperatura de descarga de los compresores, incompatibilidad con los principales lubricantes, reactividad con el cobre, lo que obliga a construir las tuberías de acero, y su alta toxicidad e inflamabilidad. Incluso presenta inconvenientes en plantas de pequeño tamaño, pues al ser tan alta su entalpía específica y, por tanto, tan bajo el flujo necesario en los intercambiadores de calor, se complica el control de la inyección de refrigerante. También se complica el diseño de equipos compactos pues el bobinado del motor tiene que ser de aluminio en lugar de cobre. Como consecuencia de lo anterior, el R-717 se emplea en grandes plantas de refrigeración mediante sistemas indirectos con una tecnología sustancialmente diferente a la de otros refrigerantes [Bitzer, 2018]. Recientemente, el fabricante Intarcon lanzó al mercado su gama de enfriadoras de agua glicolada o salmuera *Ammolite* que tiene una carga específica de 65 gramos por kW frigorífico y la mayor eficiencia energética de todo su catálogo, resultando en un coste del ciclo de vida de 6000 € por kW frigorífico instalado [INTARCOND, 2020].

El dióxido de carbono (R-744) como refrigerante es una sustancia que no tiene impacto medioambiental y que además está clasificado como alta seguridad, pues no es ni tóxico ni inflamable. También su coste es bajo y su conductividad térmica elevada, lo que se traduce en intercambiadores de calor de menos superficie. Otra ventaja es su alta capacidad volumétrica y bajas pérdidas de carga, lo que significa que se necesita poco caudal másico de R-744 en los intercambiadores de calor, tuberías de menor tamaño y poco coste en el bombeo del circuito de baja. Sin embargo, sus propiedades termodinámicas no son tan favorables en el rango habitual de la refrigeración y la climatización, pues su temperatura crítica es de tan solo 31°C a 74 bar. Destaca su uso en el sector de baja de ciclos en cascada de grandes plantas de refrigeración industriales y comerciales, lo que permite operar en estado subcrítico asegurando una alta eficiencia energética. En el sector de alta de estos sistemas es habitual emplear R-134a y R-717. Es posible operar en ciclos transcíticos, pero para mantener los mismos niveles de eficiencia energética se necesitan ciclos complejos como sistemas booster (es un ciclo cascada con CO₂ subcrítico en baja y CO₂ transcítico en alta), compresores paralelos o eyectores (sistemas que permiten reducir el consumo de compresión aprovechando la alta presión del fluido que se expande) [Bitzer, 2020].

El R-32 es un HFC de bajo GWP usado inicialmente como componente de mezclas. Su mayor virtud es su reducido GWP de 675, lo que ha permitido obtener mezclas con un GWP de aproximadamente 2000 kg equivalentes de CO₂ como toda la gama del R-407 o el R-410A. El principal motivo por el que no se apostó por esta sustancia desde un primer momento es su inflamabilidad, pues el R-32 pertenece a la categoría A2L. Además, su temperatura de ebullición normal es de -52°C, por lo que son habituales presiones de operación altas. También es elevado su exponente de compresión isentrópica, lo que se traduce en elevadas temperaturas de descarga. No obstante, el R-32 sí tiene otras propiedades termodinámicas favorables como una alta capacidad frigorífica volumétrica (kW de potencia útil que se obtienen por cada m³/s de gas refrigerante) o reducidas

pérdidas de presión gracias a su baja densidad de vapor. Hoy en día, la tecnología para usarlo con seguridad en equipos de pequeña carga como A/C o bombas de calor está ya desarrollada. También se considera una alternativa para equipos más grandes, como chillers para sistemas centralizados de climatización. Por último, además de las mezclas mencionadas anteriormente, también se investiga el R-32 como componente de mezclas con HFOs para conseguir refrigerantes de muy bajo GWP. Su rango de operación es de 20 a -20°C de temperatura de evaporación [BITZER, 2018]. Tras consultar varios aparatos Split de los fabricantes LG (2020) y TOSHIBA (2020) se estiman que son necesarios unos 200 gramos de R-32 para conseguir 1 kW de potencia frigorífica, mientras que los Splits de R-410A o R-407C podían tener una carga específica de 300 gramos por kW de potencia frigorífica.

El R-152a es un HFC de bajo GWP (124) con propiedades similares al R-134a, como la capacidad frigorífica volumétrica (-5%), los niveles de presión (-10%) y la eficiencia energética (+6%). Otras propiedades son más favorables, como la densidad de vapor más baja que asegura menores pérdidas de presión (-40%). Su temperatura de ebullición es de -25°C, mientras que la del R-134a es -26°C. El principal inconveniente es su ligera inflamabilidad, estando clasificado en el grupo A2, por lo que se necesitan desarrollar equipos con medidas especiales de seguridad [BITZER, 2018]. Se usa habitualmente como componente de mezclas, pero ya se está investigando su uso en equipos de refrigeración. Por ejemplo, INTARCON tiene en su catálogo enfriadoras para centrales indirectas de R-152a con potencias de hasta 260 kW y una carga específica de 200-250 gramos por kW (gama MWW-KC-xxxxx).

El R-1234ze(E) es una olefina HFO que, aunque a veces se considere un sustituto del R-134a, realmente tiene una capacidad volumétrica específica un 20% inferior. Tiene una temperatura de ebullición de -19°C, por lo que es más aplicado para aplicaciones con una temperatura de evaporación más elevadas, desde -15°C hasta 40°C, parecidas a las del R-600a. Su GWP es de tan solo 7 kg equivalentes de CO₂ [Bitzer, 2018]. En marzo de 2020, la compañía Johnson Controls lanzó una enfriadora con este gas. Alcanza potencias desde 313-1228 kW y emplea un compresor de tornillo. Esta pensada para refrigerar procesos industriales y climatizar grandes edificios [Johnson Controls, 2020]. Por su parte, Carrier desarrolla toda una línea de enfriadoras que utilizan refrigerantes de bajo GWP, la AquaForce PUREtec. El último en añadirse a esta lista, en mayo de 2020, ha sido la gama de enfriadoras 30XB/P-ZE que emplea R-1234ze(E) y consigue potencias desde 200 a 1200 kW [Climatización y confort, 2020].

Los hidrocarburos más empleados como refrigerante son el propano (R-290) y el isobutano (R-600a). El refrigerante R-441A es una mezcla de cuatro hidrocarburos como son el etano (R-170), el butano (R-600) y los dos anteriores. En cuanto a sus propiedades termodinámicas, el propano R-290 es apto para el rango de temperaturas de evaporación 18°C a -40°C, mientras que el R-600a es más adecuado para mayores temperaturas, aproximadamente desde 40°C a -12°C o incluso -25°C operando en condiciones de vacío. No presentan problemas de incompatibilidad con los materiales ni tampoco problemas medioambientales [Bitzer, 2018]. Su precio es también bastante bajo, en torno a 12 €/kg según Intarcon (2019). La gran desventaja es su alta inflamabilidad, estando clasificados como refrigerantes A3 lo que limite la carga que puede instalarse de estos refrigerantes. Su uso está extendido en frigoríficos y congeladores domésticos, sobre todo el R-600a. Por su parte, el R-290 se emplea en enfriadoras de líquido industriales de baja y media potencia. La restricción de la F-gas de limitar a 150 desde 2020 el GWP de los aparatos portátiles de A/C ha hecho que se desarrolle la tecnología para utilizar los hidrocarburos en estas aplicaciones. Se espera que en un futuro también puedan emplearse en aparatos Split de A/C y en sistemas indirectos de refrigeración comercial. Según el estudio realizado por Life Front (2018), la carga específica para los hidrocarburos se sitúa en torno a 150 gramos por kW frigorífico. Se puede desglosar por aplicación con algo más de detalle: 200 g/kW en refrigeración comercial, 100 g/kW en A/C partido, 80 g/kW en A/C compacto y 100 g/kW en Rooftop.

4.1.1 Refrigeración doméstica

Los sistemas de refrigeración domésticas son sistemas directos compactos encontrados en las cocinas de las viviendas. Se supondrá una cocina de 25 m³. Los refrigerantes que van a compararse son el R-134a, el R-1234ze(E), el R-600a, el R-290 y el R-441A. La carga máxima en kg aplicando las normas EN 378:2016 y ASHRAE 15 se muestran en la Tabla 20.

Según el ASHRAE 15 la carga máxima de estos aparatos, por ser un sistema de alta probabilidad, se calcula como el producto del RCL por el volumen del local, con un mínimo bastante elevado de 3 kg por ser un aparato

compacto en un local residencial. Los refrigerantes de clases A3 o B3 no pueden utilizarse a no ser que se cuente con la autorización de la autoridad local competente. En este sentido, la EPA a través del programa SNAP permite unas cargas máximas de 150 gramos para el R-290, el R-600a y el R-441A.

Según la norma EN 378:2016 este sistema se encuentra en un local de acceso A y la clase de emplazamiento es I. La carga máxima del R-134a se ha determinado como su límite práctico por el volumen del local. La del R-1234ze(E) es la cota inferior m_1 . Para los refrigerantes de clase A3 la carga máxima obtenida es inferior al mínimo establecido en el artículo 2 del RSIF por lo que la carga máxima será de 0.5 kg. En la Tabla 20 se muestra el valor calculado aplicando la norma EN 378:2016 y entre paréntesis estos mínimos de carga del RSIF.

Tabla 20. Carga máxima permitida en kg para un sistema de refrigeración doméstica en una cocina de 25 m³ según las normas EN 378:2016 y el ASHRAE 15

Refrigerante	EN 378:2016 (RD 552:2019)	ASHRAE 15
R-134a	6.25	5.25
R-1234ze(E)	1.82	3
R-600a	0.215 (0.5)	0.15
R-290	0.190 (0.5)	0.15
R-441A	0.158 (0.5)	0.15

Con respecto al R-134a, en principio la norma EN 378:2016 permite más carga que el ASHRAE 15 porque el límite práctico de la norma europea es ligeramente superior al RCL del ASHRAE. En cualquier caso, la carga es suficiente para estas aplicaciones. Aun así, como su GWP es superior a 150, está prohibido su uso en refrigeración doméstica en los países de la Unión Europea desde el 1 de enero de 2015. También estará prohibido en los Estados Unidos a partir del 1 de enero de 2021.

Para el R-1234ze(E) en ambos casos la carga permitida es más que suficiente para poder emplear este refrigerante A2L en frigoríficos y congeladores domésticos. Se observa que el ASHRAE 15 permite una carga muy superior, pues tiene un mínimo de 3 kg en contraposición con el mínimo de 1.82 kg del EN 378:2016. Asumiendo una carga específica de 400 gramos por kW, se estima que la norma EN 378:2016 permite frigoríficos de hasta 4.5 kW y el ASHRAE 15 de hasta 7.5 kW, lo que se corresponde con equipos de gran capacidad.

Para los tres refrigerantes de clase A3 el ASHRAE 15 presenta obstáculos para su uso en viviendas. El máximo de 150 gramos propuesto por la SNAP abre la puerta a construir equipos de refrigeración domésticas con estos refrigerantes, aunque con potencias frigoríficas de aproximadamente 1 kW. Las cargas que resultan por la norma EN 378:2016 son ligeramente superiores, sobre todo para el R-600a (215 gramos). En el RD 552:2019 para estos aparatos compactos se permite un mínimo de 500 gramos, por lo que no debería haber problemas para su uso, pues esto resulta en aparatos de unos 3.33 kW. De cualquier manera, el standard vertical IEC 60335-2-24 no consiente cargas mayores a 150 gramos.

Se concluye que, en la práctica, las alternativas de GWP casi nulo en frigoríficos y congeladores domésticos son posibles. En Europa, la norma EN 378:2016 es menos restrictiva que el standard vertical IEC 60335-2-24. En Estados Unidos, el ASHRAE 15 no permite el uso de hidrocarburos, pero la EPA sí autorizó su uso, por lo que no existen barreras reales. En la actualidad, ya se están fabricando estos equipos con R-600a puesto que no es de esperar que en aplicaciones domésticas se requiera una potencia frigorífica mayor de 1 kW.

4.1.2 Refrigeración comercial en un pequeño comercio

La refrigeración en un pequeño comercio puede hacerse mediante frigoríficos y congeladores, que son equipos compactos directos, o mediante unidades de condensación remota, que son sistemas partidos cuyos compresores y condensador se ubican en el exterior. La ventaja de los segundos es que no evacúan el calor al interior del local. Los refrigerantes que se van a considerar son el R-134a, el R-404A, el R-407A, el R-744, el R-152a, el R-600a, el R-290 y el R-441A. Se supone un comercio de 150 m² y, aproximadamente, 450 m³. Se incluyen aquí

restaurantes o pequeñas tiendas.

Desde el punto de vista medioambiental, el Reglamento 517:2014 limita el GWP en estas aplicaciones a 2500, aunque a partir del 1 de enero de 2022 se reducirá a 150 en frigoríficos y congeladores comerciales. En el programa SNAP el GWP está limitado actualmente a 630 en frigoríficos comerciales, a 1510 en congeladores comerciales y a 2630 en las unidades de condensación.

Según la norma EN 378:2016, los frigoríficos y congeladores domésticos se ubican en emplazamientos de clase I, mientras que las unidades de condensación remota son de clase II. El tipo de local podría ser tanto de acceso A en el caso de restaurantes o acceso B en pequeñas tiendas si el encargado conoce las medidas de evacuación.

Según el ASHRAE 15, los frigoríficos y congeladores comerciales por ser equipos compactos pueden instalarse sin restricciones de carga de hasta 10 kg. Esto no se aplica al R-600a, el R-290 o el R-441A por ser estos refrigerantes de clase A3 y teniendo, de acuerdo con la EPA, una carga máxima de 150 gramos. Para el resto de los refrigerantes en estas aplicaciones la carga se calcula multiplicando el producto del RCL por el volumen del local. Para las unidades de condensación remota los refrigerantes de inflamabilidad A3 no están permitidos ni contemplados en el programa SNAP, luego no se pueden comercializar equipos con estos refrigerantes. Para los otros, la carga máxima se calcula como el producto del RCL por el volumen del local.

En la Tabla 21 y la Tabla 22 se muestran los resultados de carga máxima para estos dos sistemas. Se observa que los resultados son idénticos con excepción de los resultados prohibidos por su GWP.

Para los tres HFC convencionales estudiados, es decir, el R-134a, el R-404A y el R-407A la carga permitida es más que suficiente para estos sistemas. Sin embargo, el R-404A ya no puede emplearse para la refrigeración de pequeños comercios ni en Europa ni en Estados Unidos. El R-407A no puede utilizarse en frigoríficos y congeladores comerciales en Estados Unidos, pero sí en Europa hasta el 1 de enero de 2022. Con respecto al R-134a, en Estados Unidos solo está permitido en congeladores comerciales mientras que en Europa estará prohibido tanto en frigorífico como en congeladores a partir de 2022. En las unidades motocondensadoras el R-134a y el R-407A pueden seguir empleándose tanto en Europa como en Estados Unidos.

Por su parte, el R-744 no tiene restricciones desde el punto de vista medioambiental. En Europa se permite con cargas de refrigerante muy elevadas de 45 kg en locales de acceso A e ilimitada en locales de acceso B. Sin embargo, en Estados Unidos las cargas permitidas son casi la mitad. Esto se debe a que el cálculo de la carga por toxicidad se hace en la norma europea con un límite práctico de 0.1 kg/m^3 y en el ASHRAE 15 con un RCL de 0.054 kg/m^3 . De cualquier manera, la carga permitida en Estados Unidos es más que suficiente para refrigerar los productos de un pequeño comercio.

La carga de R-152a se calcula como el 20% del LFL por el volumen del local para los dos tipos de sistemas y en los dos tipos de locales. La carga máxima está acotada a 3.38 kg, alcanzándose este valor con un volumen de 130 m^3 (aproximadamente 43 m^2). En Estados Unidos, en cambio, no solo el RCL es superior al de la EN 378:2016 sino que no hay una cota superior. Por este motivo, para el comercio considerado, se permiten hasta 14.4 kg.

Con respecto al R-600a, el R-290 y el R-441A la carga máxima permitida en Europa tanto en frigoríficos y congeladores como en unidades de condensación remota es de 1.5 kg en locales de acceso A y 2.5 kg en locales de acceso B, mientras que la EPA no permite superar los 150 gramos en equipos compactos y ni tan siquiera contempla su uso en equipos partidos. Esto significa que, en principio, es más sencillo en Europa utilizar estos refrigerantes inflamables en equipos compactos y partidos de refrigeración comercial. Aun así, hay que recordar que el estándar vertical europea EN 60335-2-89 no permite más de 150 gramos en los equipos compactos.

Se concluye, en primer lugar, que la transición a R-744 es posible tanto en Estados Unidos como en Europa. El R-152a en Europa está bastante limitado y habría que analizar su viabilidad en cada caso, mientras que es una alternativa totalmente factible en Estados Unidos sea cual sea la superficie del local. En contraste, los hidrocarburos están muy limitados en Estados Unidos: tan solo en frigoríficos y congeladores con cargas inferiores a 150 gramos. En Europa se pueden emplear con cargas superiores en equipos autónomos e incluso en sistemas partidos. No obstante, aunque la última versión de la norma IEC 60335-2-89 establece las condiciones de diseño para poder utilizar hasta 500 gramos de hidrocarburo en equipos compactos de refrigeración comercial, la norma europea en vigor EN 60335-2-89 sigue sin permitir más de 150 gramos. Urge actualizar esta norma para poder cumplir con las exigencias de GWP inferior a 150 que entrará en vigor en 2022 para estos equipos.

Tabla 21. Carga máxima permitida en kg para frigoríficos y congeladores en un pequeño comercio según las normas EN 378:2016 y ASHRAE 15

Refrigerante	EN 378:2016 (RD 552:2019)		ASHRAE 15
	Acceso A	Acceso B	
R-134a	112.5	Sin límite	94.5 (solo en congeladores)
R-404A	234	Sin límite	225
R-407A	148.5	Sin límite	135
R-744	45	Sin límite	24.3
R-152a	3.38	3.38	14.4
R-600a	1.5	2.5	0.15
R-290	1.5	2.5	0.15
R-441A	1.5	2.5	0.15

Tabla 22. Carga máxima permitida en kg para unidades de condensación remota en un pequeño comercio según las normas EN 378:2016 y ASHRAE 15

Refrigerante	EN 378:2016 (RD 552:2019)		ASHRAE 15
	Acceso A	Acceso B	
R-134a	112.5	Sin límite	94.5
R-404A	234	Sin límite	225
R-407A	148.5	Sin límite	135
R-744	45	Sin límite	24.3
R-152a	3.38	3.38	14.4
R-600a	1.5	2.5	No permitido
R-290	1.5	2.5	No permitido
R-441A	1.5	2.5	No permitido

4.1.3 Refrigeración comercial en una gran superficie comercial

Se van a analizar cuatro tipos de sistemas: unidades de condensación remota, centrales frigoríficas directas, centrales frigoríficas en cascada y centrales frigoríficas indirectas. Los refrigerantes analizados serán el R-134a, el R-407A, el R-404A, R-717, el R-152a, el R-600a, el R-290 y el R-744.

Según su GWP encontramos que en la Unión Europea ya están prohibidos los refrigerantes con un GWP superior a 2500. A partir de 2022, las centrales frigoríficas verán reducido su GWP a 150 excepto en el circuito primario de centrales frigoríficas en cascada, que estará restringido a 1500. En el programa SNAP encontramos tan solo una limitación desde 2017 del GWP a refrigerantes con un GWP superior a 2630.

Según la norma EN 378:2016, las unidades de condensación remota, las centrales frigoríficas directas y el sector de baja del sistema en cascada son emplazamientos de tipo II y, al ser de expansión directa en la zona del supermercado abierta al público, se encuentran en un local de clase A. En cambio, la central frigorífica indirecta y el sector de alta del sistema en cascada tienen emplazamientos de tipo III y se encuentran en un local de acceso autorizado tipo C.

Según ASHRAE 15 esta ubicación sería una gran superficie comercial. Si el sistema es una central frigorífica indirecta con un refrigerante secundario frigorífero o el sector de alta de un sistema en cascada, entonces el sistema se considera de baja probabilidad y la única restricción es que la carga de refrigerantes de clases A2, A3, B2 y B3 no podrá ser superior a 500 kg. Además, para utilizar refrigerantes A3 y B3 es necesaria una autorización. El resto de los sistemas aquí planteados –unidades de condensación remota, central frigorífica directa o línea de baja de sistemas en cascada – son sistemas de alta probabilidad. La carga máxima se calcula como el producto del RCL por el volumen del local. La carga máxima de refrigerantes A2, A3, B2 y B3 está igualmente acotada a 500 kg, estando prohibidos los de clase A3 y B3 sin autorización.

Tabla 23. Carga máxima permitida en kg para una unidad de condensación remota en una gran superficie comercial según las normas EN 378:2016 y ASHRAE 15

Refrigerante	EN 378:2016 (RD 552:2019)	ASHRAE 15
R-134a	$V \cdot 0.25$	$V \cdot 0.21$
R-404A	$0.52 \cdot V$	$V \cdot 0.5$
R-407A	$0.33 \cdot V$	$V \cdot 0.3$
R-744	$0.1 \cdot V$	$V \cdot 0.054$
R-717	$0.00035 \cdot V < 4.53 \text{ kg}$	$V \cdot 0.00022$
R-152a	$0.026 \cdot V < 3.38$	$V \cdot 0.032 < 500$
R-600a	$0.009 \cdot V < 1.5$	No permitido
R-290	$0.008 \cdot V < 1.5$	No permitido

Las Tabla 23 y Tabla 24 muestran que los sistemas de condensación remota y las centrales frigoríficas de expansión directa son iguales desde el punto de vista de la normativa de seguridad. Se muestran las cargas máximas permitidas en función del volumen del supermercado. Se pretende comparar los HFC convencionales con los refrigerantes alternativos. Sin lugar a duda, el que permite mayores cargas es el R-744, aunque siendo un 60% inferior a la permitida para el R-134a en la norma EN 378:2016 y un 75% en el ASHRAE 15. En Europa, la carga máxima permitida para amoníaco se calcula por toxicidad, pero está acotada por inflamabilidad a 4.53 kg, lo que se alcanza cuando el volumen del supermercado es de 13000 m³. En el ASHRAE 15 no hay cota superior, pero al ser el RCL mucho menor, la carga es un 99.9% a la permitida para el R-134a y solo supera a la norma EN 378:2016 cuando el volumen del local es mayor de 20600 m³. Para el R-152a la carga está acotada a tan solo 3.38 kg en Europa a partir de locales de 130 m³, lo cual se supera en estas aplicaciones. En Estados Unidos, el ASHRAE 15 permite cargas de R-152a un 85% inferiores a las de R-134a y está acotado superiormente por 500 kg, lo cual se alcanza en locales de más de 15700 m³. Con respecto a los hidrocarburos, están acotados a 1.5 kg en Europa y prohibidos en Estados Unidos.

La Tabla 25 muestra las cargas máximas permitidas para una central frigorífica indirecta ubicada en la zona restringida de un supermercado. No hay límite de carga para los HFC convencionales ni en la norma EN 378:2016 ni en la ASHRAE 15. Tampoco hay limitación de carga para el R-744 y el R-717. Para el R-152a no hay limitación en Europa, pero sí está acotado a 500 kg en Estados Unidos. Por último, la norma EN 378:2016 tampoco limita la carga de los hidrocarburos por ser el local de acceso C. En cambio, el R-600a y el R-290, al igual que el resto de los refrigerantes de clase A3, no están permitidos en Estados Unidos sin previa autorización de la autoridad local competente.

Para analizar el caso de una central frigorífica en cascada habría que emplear la Tabla 24 para el sector de baja

y la Tabla 25 para el sector de alta.

Tabla 24. Carga máxima permitida en kg para una central frigorífica directa en una gran superficie comercial según las normas EN 378:2016 y ASHRAE 15

Refrigerante	EN 378:2016 (RD 552:2019)	ASHRAE 15
R-134a	$V \cdot 0.25$	$V \cdot 0.21$
R-404A	$0.52 \cdot V$	$V \cdot 0.5$
R-407A	$0.33 \cdot V$	$V \cdot 0.3$
R-744	$0.1 \cdot V$	$V \cdot 0.054$
R-717	$0.00035 \cdot V < 4.53 \text{ kg}$	$V \cdot 0.00022$
R-152a	$0.026 \cdot V < 3.38$	$V \cdot 0.032 < 500$
R-600a	$0.009 \cdot V < 1.5$	No permitido
R-290	$0.008 \cdot V < 1.5$	No permitido

Tabla 25. Carga máxima permitida en kg para una central frigorífica indirecta en una gran superficie comercial según las normas EN 378:2016 y ASHRAE 15

Refrigerante	EN 378:2016 (RD 552:2019)	ASHRAE 15
R-134a	Sin limite	Sin límite
R-404A	Sin limite	Sin límite
R-407A	Sin limite	Sin límite
R-744	Sin limite	Sin límite
R-717	Sin limite	Sin límite
R-152a	Sin limite	500
R-600a	Sin límite	No permitido
R-290	Sin límite	No permitido

Se concluye que sí existen alternativas viables al R-134a y el R-407A. Estamos preparados en Europa para hacer frente a la reducción a 150 kg equivalentes de CO₂ a partir de 2022. Se emplearán unidades de condensación remota con R-744. La normativa F-Gas permite los sistemas en cascada con R-134a en alta y R-744 en baja, lo cual es interesante para evitar operar el R-744 en zona transcítica. También son factibles las centrales frigoríficas indirectas o los sectores de alta en cascada con otros refrigerantes como R-717 o hidrocarburos.

En Estados Unidos, la EPA tan solo ha limitado el GWP a 2630, lo cual solo afecta al R-404A. Son viables las mismas alternativas que en Europa, aunque con ciertos matices: el R-744 se permite con cargas ligeramente inferiores, el R-152a es aquí también una alternativa factible para unidades de condensación remota y los hidrocarburos están prohibidos en las centrales frigoríficas indirectas o los sectores de alta presión de sistemas en cascada.

4.1.4 Refrigeración industrial de cámaras frigoríficas

Se analiza una cámara frigorífica en función de su volumen. Tal y como se comentó en la introducción se utilizan equipos compactos (monoblock) y semicompactos. Los refrigerantes analizados serán el R-134a, el R-404A, el R-717 y el R-290. En el Reglamento europeo 517/2014 tan solo encontramos la restricción de que el GWP deba ser inferior a 2500. En el programa SNAP se restringirá el GWP a valores inferiores a 2090 a partir de 2023.

Según la norma EN 378:2016 estos recintos son locales de acceso C. Los sistemas monoblock son de emplazamiento clase I, mientras que los semicompactos son de emplazamiento clase II. La ocupación es inferior a 1 persona por cada 10 m². El R-134a y el R-404A no tienen limitaciones en emplazamientos industriales. El amoníaco no tiene limitación en sistemas semicompactos, mientras que en sistema monoblock la carga se calcula como el 20% del LFL por el volumen de la cámara con una cota superior de 50 kg. Con respecto al R-290 la carga se calcula también como el 20% del LFL por el volumen de la cámara con una cota superior de 10 kg en sistemas monoblock y de 25 kg en sistemas semicompactos.

Según la norma ASHRAE 15 al ser una cámara frigorífica no habría carga máxima si se cumplen ciertas condiciones de seguridad. Aun así, el total de refrigerantes inflamables no pueden superar los 500 kg.

Tabla 26. Carga máxima permitida en kg para sistemas monoblock en una cámara frigorífica según las normas EN 378:2016 y ASHRAE 15

Refrigerante	EN 378:2016 (RD 552:2019)	ASHRAE 15
R-134a	Sin límite	Sin límite
R-404A	Sin límite	Sin límite
R-717	Ver Figura 11	500
R-290	Ver Figura 11	500

Tabla 27. Carga máxima permitida en kg para sistemas semicompactos en una cámara frigorífica según las normas EN 378:2016 y ASHRAE 15

Refrigerante	EN 378:2016 (RD 552:2019)	ASHRAE 15
R-134a	Sin límite	Sin límite
R-404A	Sin límite	Sin límite
R-717	Sin límite	500
R-290	Ver Figura 11	500

Los resultados de la Tabla 26 y la Tabla 27 ponen de manifiesto que actualmente el R-134a puede emplearse sin restricciones de carga en Europa y Estados Unidos para la refrigeración de cámaras frigoríficas tanto en sistemas monoblock como semicompactos. Tampoco se prevé ni en el Reglamento 517/2014 ni en el programa SNAP vetar directamente al R-134a, aunque sí es previsible que su precio se eleve en los próximos años dado su GWP de 1430. El R-404A, si bien no tiene tampoco restricciones en ninguna de las dos normas, ya está prohibido en Europa y lo estará en Estados Unidos a partir de 2023 por su alto GWP.

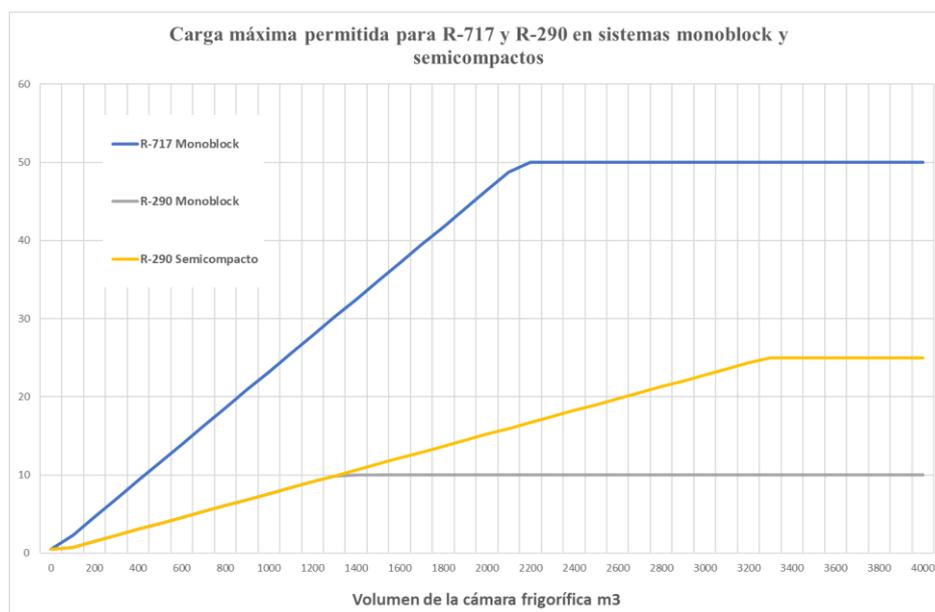


Figura 11. Carga máxima permitida (kg) por la norma EN 378:2016 para R-717 y R-290 en sistemas monoblock y semicompactos para la refrigeración de una cámara frigorífica en función de su volumen

El amoníaco es la gran apuesta de las cámaras frigoríficas en Estados Unidos, teniendo un límite elevadísimo de 500 kg. En Europa, no hay restricción al R-717 en sistemas semicompactos, pero sí lo hay en sistemas monoblock, con un máximo de 50 kg a partir de 2200 m³. El R-290 sí se permite en ASHRAE 15 por ser una instalación industrial con una carga máxima de 500 kg. En la norma EN 378:2016 para cámaras de menos de 1400 m³ los sistemas monoblock permiten la misma carga que los semicompactos. A partir de este volumen la carga de los monoblock está acotada a 10 kg, mientras que en semicompactos puede llegar a ser de hasta 25 kg para un volumen de 3300 m³.

No es de esperar que haya problemas en la refrigeración de cámaras frigoríficas a raíz de las prohibiciones de la Comisión Europea o la EPA, pues existen alternativas permitidas como el R-717 suficientemente contrastadas y permitidas por los estándares de seguridad en cargas suficientes. En Europa, el R-290 es también una alternativa en cámaras de pequeño y mediano tamaño. No obstante, los resultados de la Figura 11 muestran que el amoníaco tiene una carga más favorable que el propano para cualquier volumen de cámara, siendo incluso ilimitada en sistemas semicompactos.

4.1.5 Climatización de la estancia de una vivienda

Se va a analizar la climatización de una estancia de 30 m² (81 m³) en una vivienda mediante A/C partido y un equipo de A/C portátil. Los refrigerantes contemplados son el R-134a, el R-410A, el R-407C, el R-32 y el R-290. En el Reglamento 517/2014 se limitó a 150 el GWP en A/C portátil desde 2020 y se restringirá a 750 el GWP máximo en A/C partidos a partir de 2025. En el programa SNAP no existen limitaciones a estas aplicaciones, aunque algunos estados como California planean limitar el GWP a 750 desde 2023.

Según la EN 378 una vivienda es un local de acceso A, porque sus ocupantes no tienen por qué estar familiarizados con las medidas de seguridad y evacuación. En cuanto al emplazamiento, un A/C partido es clase II y un A/C portátil es clase I. La carga de los refrigerantes de clase A1 de A/C partidos y sistemas compactos se calcula como el producto del límite de toxicidad por el volumen del local. Para el R-32 y el R-290 se calcula según la ecuación (3-3) con máximo m_2 para el R-32 y el mayor entre m_2 y 1.5 kg para el R-290.

Según el ASHRAE 15 los dos tipos de sistemas son de alta probabilidad. La carga máxima se calcula multiplicando el volumen del local por el RCL. La Regla del 10 de abril de 2015 establece unos límites de carga máximos para aparatos de A/C partidos y compactos que empleen R-32 y R-290, entre otros. Esta carga es en función del tipo de equipo y la potencia de este. De las estimaciones de la Tabla 8 podemos deducir que este local de 30 m² tendrá una demanda de climatización de 2.35 kW (8000 BTU/h). Al ser una aplicación de confort

humano no pueden emplearse refrigerantes de las clases A3 y B3, aunque se permitirá para los A/C partidos y los equipos compactos con la carga máxima que dictamina la Regla del 10 de abril de 2015 de la EPA.

La carga específica en los aparatos Split es de 300 gramos por kW para los HFC convencionales, de 200 gramos por kW para el R-32 y de 100 gramos por kW para el R-290. En el caso de aparatos de aire acondicionado portátil se estiman 220 gramos por kW para los HFC convencionales, 150 gramos/kW para el R-32 y 80 gramos/kW para el R-290.

Tabla 28. Carga máxima permitida en kg para aparatos de A/C partidos en una vivienda según las normas EN 378:2016 y ASHRAE 15

Refrigerante	EN 378:2016 (RD 552:2019)	ASHRAE 15 (Regla 10 abril 2015 EPA)
R-134a	20.3	17
R-410A	35.6	34
R-407C	25.1	26.8
R-32	5.6	6.25 (5.41)
R-290	0.4 (0.5)	0.77 (0.4)

Tabla 29. Carga máxima permitida en kg para aparatos de A/C portátiles en una vivienda según las normas EN 378:2016 y ASHRAE 15

Refrigerante	EN 378:2016 (RD 552:2019)	ASHRAE 15 (Regla 10 abril 2015 EPA)
R-134a	20.3	94.5
R-410A	35.6	189
R-407C	25.1	149
R-32	2.5	34.7 (4.03)
R-290	0.3 (0.5)	4.3 (0.3)

En la Tabla 28 se muestran los resultados de carga máxima permitida para A/C partidos y en la Tabla 29 para los aparatos portátiles de A/C. No hay problemas de carga, como era de esperar, para los refrigerantes de alta seguridad como son el R-134a, el R-410A y el R-407C ni en la norma EN 378:2016 ni según el ASHRAE 15. En la Unión Europea ya no se permiten estos refrigerantes en aparatos portátiles y tampoco se permitirán en A/C partidos desde 2025. En Estados Unidos aun se permiten y no hay planes aprobados para restringirlos, pero es de esperar que las restricciones acabarán llegando también a estos refrigerantes de alto GWP.

Al R-32 en A/C partidos se le permiten 5.6 kg según la norma europea y 5.41 kg según la Regla de la EPA, esto se traduce en 28 kW y 27 kW, respectivamente. Son resultados muy parecidos y que permiten, sin lugar a duda, construir aparatos de aire acondicionado para viviendas con este refrigerante de baja inflamabilidad. En el caso de A/C portátiles, el R-32 está vetado en la Unión Europea por tener un GWP de 675, y los 4.03 kg permitidos por la EPA permiten también potencias frigoríficas de 27 kW en los Estados Unidos.

Por último, observamos que la norma EN 378:2016 y el ASHRAE 15 arrojan los mismos resultados de carga para el R-290 con 0.4 kg en A/C partidos y 0.3 kg en A/C portátiles, esto son 4 kW y 3.75 kW, respectivamente. Estas cargas son bastantes pequeñas, pero sí permiten dar la potencia requerida para esta superficie de 2.35 kW. No obstante, hay que destacar que el Reglamento de Seguridad para Instalaciones Frigoríficas (RD 552:2019) permite una carga mínima de 0.5 kg para estos refrigerantes, lo que eleva sus posibilidades de ser empleado para la climatización en viviendas.

Se concluye que los actuales estándares no ponen impedimentos para emplear el R-32 como refrigerante en A/C Split en viviendas. El standard vertical IEC 60335-2-40 sugiere una cota máxima de 12 kg, lo que se traduce en unos 60 kW de potencia de climatización. Esto permite climatización incluso de grandes superficies con aparatos autónomos. Sin embargo, el GWP de 675 del R-32 hace que este no sea una alternativa viable a largo plazo. En la actualidad, el standard anteriormente mencionado permite una carga máxima de 1 kg de R-290 en estos aparatos, es decir, permiten cubrir una demanda de unos 10 kW. De la Tabla 8 se deduce que aparatos Split con R-290 permitirán climatizar superficies de hasta 200 m².

Con respecto a los aparatos portátiles de A/C, el IEC 60335-2-40 consiente hasta 8·LFL kg de carga. Para el R-32, se permiten 2.45 kg (16 kW), más que suficiente para cualquier aplicación. Para el R-290, este límite se traduce en 300 gramos (3.75 kW), por lo que podría emplearse para climatizar locales de hasta 50 m² según las correlaciones de la Tabla 8.

Actualmente, el standard de aparatos de climatización en vigor en EE. UU. es el UL 484 que no permite cargas superiores a 3·LFL, es decir, 0.92 kg para R-32 y 115 gramos para el R-290. Las potencias que se derivan de estos límites máximos en aparatos Splits son de 4.6 kW para el R-32 y 1.15 kW para el R-290. Por tanto, este límite permitiría climatizar pequeñas estancias con R-32, pero se antoja insuficiente para utilizar R-290. No obstante, se prevé que Underwriters Laboratories adopte el standard IEC 60335-2-40 a corto plazo.

4.1.6 Climatización de un pequeño comercio

Se considera un pequeño comercio de 150 m² y 450 m³. Se van a analizar tres posibilidades de climatización. La primera es mediante un sistema rooftop de descarga por conductos. La segunda mediante unidades de A/C de pared. La tercera mediante equipos compactos horizontales en el falso techo. Los refrigerantes que se van a analizar son el R-134a, el R-410A, el R-407C, el R-32 y el R-290. A partir del 1 de enero de 2025 el GWP en la Unión Europea está limitado a 750 para aparatos partidos de A/C si la carga es inferior a 3kg.

Según la EN 378 un comercio puede ser un local tanto de acceso A como de acceso B. En cuanto al emplazamiento, un rooftop es clase III, un A/C partido es clase II y el sistema compacto es clase I. Para el rooftop no hay límite de carga para ningún refrigerante excepto para el R-290, que tiene una carga máxima de 10 kg. La carga de los refrigerantes de clase A1 de A/C partidos y sistemas compactos es ilimitada al ser un local de categoría B. Para el R-32 y el R-290 se calcula según la ecuación (3-1) con máximo m₂ para el R-32 y el mayor entre m₂ y 1.5 kg para el R-290.

Según el ASHRAE 15 los tres tipos de sistemas son de alta probabilidad. El A/C partido y el equipo compacto horizontal por encontrarse en el espacio ocupado, mientras que el sistema rooftop por ser un sistema indirecto abierto, es decir, una fuga de refrigerante en el evaporador podría fugarse al aire de impulsión y terminar en el espacio ocupado. Aun así, como todas las partes que contienen refrigerante se encuentran el aire libre no tiene límites de carga. La carga máxima en los otros dos sistemas se calcula multiplicando el volumen del local por el RCL. La Regla del 10 de abril de 2015 establece unos límites de carga máximos para aparatos de A/C partidos y compactos que empleen R-32 y R-290, entre otros. Esta carga es en función del tipo de equipo y la potencia de este. De las estimaciones de la Tabla 8 podemos deducir que este local de 150 m² tendrá una demanda de climatización de 8.79 kW (30000 BTU/h). Al ser una aplicación de confort humano no pueden emplearse refrigerantes de las clases A3 y B3, aunque se permitirá para los A/C partidos y los equipos compactos con la carga máxima que dictamina la Regla del 10 de abril de 2015 de la EPA.

La carga específica en los aparatos partidos y rooftop es de 300 gramos por kW para los HFC convencionales, de 200 gramos por kW para el R-32 y de 100 gramos por kW para el R-290. En el caso de aparatos de equipos compactos se estiman 220 gramos por kW para los HFC convencionales, 150 gramos/kW para el R-32 y 80 gramos/kW para el R-290.

Los resultados de la Tabla 30 muestran resultados muy similares entre las dos normas para los sistemas rooftop, no existiendo límites de carga para los refrigerantes diferentes a los grupos A3 y B3. Para estos últimos, la norma EN 378:2016 permite 5 kg en locales de tipo A y 10 kg en aquellos de tipo B, mientras que el ASHRAE 15 los prohíbe por ser una aplicación de confort humano.

Tabla 30. Carga máxima permitida en kg para sistemas rooftop de climatización en un pequeño comercio según las normas EN 378:2016 y ASHRAE 15

Refrigerante	EN 378:2016 (RD 552:2019)		ASHRAE 15
	Acceso A	Acceso B	
R-134a	Sin límite	Sin límite	Sin límite
R-410A	Sin límite	Sin límite	Sin límite
R-407C	Sin límite	Sin límite	Sin límite
R-32	Sin límite	Sin límite	Sin límite
R-290	5	10	Prohibido

Tabla 31. Carga máxima permitida en kg para sistemas partidos de A/C de climatización en un pequeño comercio según las normas EN 378:2016 y ASHRAE 15

Refrigerante	EN 378:2016 (RD 552:2019)		ASHRAE 15 (Regla 10 abril 2015 EPA)
	Acceso A	Acceso B	
R-134a	112.5	Sin límite	94.5
R-410A	198	Sin límite	189
R-407C	139.5	Sin límite	149
R-32	11.9	11.9	34.7 (7.96)
R-290	0.92	0.92	Prohibido (0.89)

Tabla 32. Carga máxima permitida en kg para sistemas compactos horizontales de falso techo de climatización en un pequeño comercio según las normas EN 378:2016 y ASHRAE 15

Refrigerante	EN 378:2016 (RD 552:2019)		ASHRAE 15 (Regla 10 abril 2015 EPA)
	Acceso A	Acceso B	
R-134a	112.5	Sin límite	94.5
R-410A	198	Sin límite	189
R-407C	139.5	Sin límite	149
R-32	11.9	11.9	34.7 (7.96)
R-290	0.92	1.12	Prohibido (1)

Para A/C partidos y sistemas compactos horizontales (ver Tabla 31 y Tabla 32) los refrigerantes de clase A1 como son el R-134a, el R-410A y el R-407C no tienen ningún problema de carga en ninguna de las dos normas. Para el R-32, el procedimiento de la norma europea permite hasta 11.9 kg en los dos sistemas, cantidad muy elevada y suficiente para estas aplicaciones que incluso puede elevarse con medidas adicionales como se comentó en la Figura 9, mientras que el ASHRAE 15 contempla hasta 34.7 kg. Aun así, la carga máxima está regulada por la EPA a 7.96 kg para sistemas partidos de A/C y a 7.96 kg para sistemas compactos horizontales. Estas cantidades siguen siendo suficientes para estas aplicaciones.

Por el contrario, el R-290 tiene reducida su carga en la EN 378:2016 a 0.92 kg en A/C partidos y 1.12 kg en A/C compactos, siendo superior en el segundo caso porque el procedimiento de cálculo permite una altura de instalación mayor. El ASHRAE 15 prohíbe este refrigerante por ser de clase A3, pero la realidad es que la EPA lo permite en cargas muy reducidas de 0.89 kg para A/C partidos y 1 kg para A/C compactos.

Se concluye que para rooftop en pequeños comercios no hay problemas con refrigerantes alternativos como el R-32 o el R-290. En Estados Unidos habría que revisar la normativa para permitir usar R-290 en estos sistemas si se instalan al aire libre. En A/C partidos y compactos horizontales las cargas permitidas al R-32 permiten cubrir las demandas térmicas en pequeños comercios sin ningún problema. Con respecto al R-290, las cargas permitidas, según las estimaciones de carga específicas de Life Front (2018) permiten construir equipos con potencias de, al menos, 8.9 kW por lo que sí serían compatibles para la climatización del pequeño comercio aquí analizado. Sin embargo, la Regla del 10 de abril de 2015 de la EPA no permite instalar más de 1 kg de R-290, lo cual limita la potencia de estos equipos directos a 10 kW, por lo que no se podría cubrir la demanda de climatización en comercios de más de 200 m². En cambio, el límite máximo de 1.5 kg de la norma EN 378:2016 permite potencias de hasta 15 kW aproximadamente, lo cual es totalmente compatible con comercios de mediano tamaño (300 m² aproximadamente).

4.1.7 Climatización en un gran edificio

La climatización de un gran edificio puede hacerse mediante un sistema centralizado con una enfriadora de agua o con un sistema autónomo VRF, que evidentemente necesita más carga de refrigerante. La carga máxima permitida variará según el uso del edificio. Analizaremos tres: un hospital, un bloque de viviendas y una oficina. Los refrigerantes considerados son el R-134a, el R-410A, el R-407C, el R-717, el R-1234ze(E), el R-32 y el R-290.

Las limitaciones de GWP para las enfriadoras de agua son de 2500 en Europa y de 630 a partir de 2024 en Estados Unidos. No hay restricciones a los sistemas VRF, pero no es de esperar que empleen refrigerantes de alto GWP por su alto coste y la gran carga necesaria.

Según la norma EN 378:2016, los hospitales y los edificios residenciales son edificios de acceso A, mientras que las oficinas son de acceso B. Las enfriadoras de agua son sistemas de emplazamiento tipo III. Los sistemas VRF, en cambio, son de clase II. Este sistema VRF es un buen ejemplo de sistema sobre el que interesa aplicar el anexo C.3, que permite una carga máxima de 150 kg en refrigerantes del grupo A1 y de 1.5·m₃ kg a los refrigerantes de clase A2L si se instalan dos medidas adicionales de seguridad. Para el R-290 se emplea la ecuación (3-1), aunque supondremos que se alcanza la cota superior de 1.5 kg. Para el R-717 la carga está comprendida entre el mínimo reglamentario de 0.5 kg y la cota por inflamabilidad 4.5 kg.

Según el ASHRAE 15, las enfriadoras de agua son sistemas de baja probabilidad y los sistemas VRV de alta probabilidad. Los hospitales son edificios de uso institucional luego la carga máxima de refrigerantes inflamables es de 250 kg en lugar de 500 kg y la concentración máxima permitida es el 50% del RCL. Los refrigerantes de clase A3 y B3 están prohibidos sin autorización. Los sistemas VRF son además aplicaciones de confort humano por lo que los refrigerantes diferentes a los de clase A1 y A2L están prohibidos. El programa SNAP permite usar R-32 con cargas de hasta 8 kg y R-290 con cargas de hasta 1 kg, pero estas restricciones no afectan a los sistemas VRV. El ASHRAE 15 no propone ningún método simplificado para determinar la carga máxima, por lo que se aplica la regla general de no superar el producto del RCL por el volumen del local.

En la **Tabla 33** se muestran los resultados de carga máxima permitida para una instalación de climatización centralizada con enfriadora de agua en un gran edificio. Se observa que no hay restricciones en las cargas para ningún refrigerante con excepción del R-290 o el amoníaco en el ASHRAE 15, aunque en este último caso siguen siendo suficientemente elevadas. Con respecto al R-290, las cargas permitidas en la EN 378:2016 sí podrían permitir el uso de este refrigerante en enfriadoras de agua, aunque para potencias bajas de 33 kW en hospitales y bloques de viviendas, y de 67 kW en oficinas (carga específica: 150 gramos/kW). Por el contrario, el R-290 no está permitido por el ASHRAE 15. No obstante, el RD 552/2019 en su artículo 7 señala que *“las salas de máquinas específicas, las cámaras frigoríficas y las azoteas con acceso restringido o en propiedades privadas totalmente en el exterior en las que se instalen únicamente equipos compactos, no se considerarán como locales a los efectos de establecer la carga máxima de refrigerante en las instalaciones frigoríficas”*. Esto quiere decir que si instalamos la enfriadora de agua de R-290 en una sala de máquina o en una azotea de acceso restringido podríamos superar las limitaciones de carga de 5 y 10 kg, aunque hay que realizar un análisis de

riesgo conforme a ATEX para justificar que la instalación no conlleva riesgos para la seguridad de las personas.

Tabla 33. Carga máxima permitida en kg para una enfriadora de agua en un hospital, un gran edificio residencial y un edificio de oficinas según las normas EN 378:2016 y ASHRAE 15

Refrigerante	Hospital		Residencial		Oficinas	
	EN 378:2016	ASHRAE 15	EN 378:2016	ASHRAE 15	EN 378:2016	ASHRAE 15
R-134a	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite
R-410A	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite
R-407C	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite
R-717	Sin límite	250	Sin límite	500	Sin límite	500
R-1234ze(E)	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite
R-32	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite
R-290	5	Prohibido	5	Prohibido	10	Prohibido

Tabla 34. Carga máxima permitida en kg para un sistema VRF en un hospital, un gran edificio residencial y un edificio de oficinas según las normas EN 378:2016 y ASHRAE 15

Refrigerante	Hospital		Residencial		Oficinas	
	EN 378:2016	ASHRAE 15 (EPA)	EN 378:2016	ASHRAE 15 (EPA)	EN 378:2016	ASHRAE 15 (EPA)
R-134a	150	0.11·V	150	0.21·V	Sin limite	0.21·V
R-410A	150	0.21·V	150	0.42·V	Sin limite	0.42·V
R-407C	150	0.17·V	150	0.33·V	Sin limite	0.33·V
R-717	0.5-4.5	Prohibido	0.5-4.5	Prohibido	0.5-4.5	Prohibido
R-1234ze(E)	59	0.04·V	59	0.075·V	59	0.075·V
R-32	59	0.04·V	59	0.077·V	59	0.077·V
R-290	1.5	Prohibido	1.5	Prohibido	1.5	Prohibido

(*) prohibido según ASHRAE 15, pero permitido por el programa SNAP de la EPA

En la Tabla 34 se muestran los resultados de carga máxima permitida para un sistema de climatización autónoma por VRF en un gran edificio. En primer lugar, para el R-134a, el R-410A y el R-407C hay que destacar que el procedimiento alternativo de la EN 378:2016 permite cargas de hasta 150 kg, mientras que el procedimiento tradicional del ASHRAE 15 restringe la carga al producto del RCL por el volumen más pequeño del edificio al que podría fugarse todo el refrigerante, con un 50% de reducción en hospitales. En el caso más favorable, que es utilizar R-410A, el volumen más pequeño para que ambos métodos fuesen equivalentes debería ser 357 m³ o, suponiendo una altura de 3 m, una superficie de 120 m². Es difícil que en un edificio residencial se den estas condiciones y, aunque posible, también es poco probable que ocurra en un edificio de oficinas, por lo que se concluye que el procedimiento de la norma EN 378:2016 es más favorable que el de ASHRAE 15. Con respecto al amoníaco y al propano se confirma que no son refrigerantes que puedan emplearse en estos sistemas. En

cambio, la norma EN 378:2016 no presenta barreras para el R-1234ze(E) y el R-32 en Europa. En Estados Unidos, más allá de los HFC convencionales, habría que analizar la viabilidad del R-32 y del R-1234ze(E), aunque a simple vista parece difícil que, en un gran edificio, donde la carga está limitada por el volumen ocupado más pequeño, la carga de refrigerante tolerada por ASHRAE 15 permita construir estas instalaciones, sobre todo en hospitales.

Se concluye que las alternativas más atractivas para enfriadoras de agua son el R-717, el R-1234ze(E) y el R-32, mientras que la carga máxima permitida para los hidrocarburos es, en principio, baja en Europa y nula en Estados Unidos. Por su parte, para los sistemas VRF las únicas alternativas factibles son refrigerantes del grupo A2L como el R-32 y el R-1234ze(E), aunque en Estados Unidos la carga máxima permitida es problemática en grandes instalaciones. En febrero de 2020, DAIKIN (2020b)) presentó su nuevo sistema VRF con R-32, el llamado mini VRV 5, que cumple de serie con las exigencias del anexo C.3. para así poder alcanzar las cargas máximas de 59 kg, como traer instalado detectores de fuga y alarmas sonoras. El traer estas medidas integradas de fábrica facilita el dar cumplimiento de las exigencias legales, lo que sin duda será un aliciente para que esta tecnología sea adoptada por el mercado.

Sea como fuere, los sistemas VRF presentan el inconveniente de necesitar mucha más carga de refrigerante que un sistema indirecto. Si bien estas cargas siguen cumpliendo con los límites legales, no puede despreciarse que el precio de los refrigerantes sintéticos HFC es realmente elevado y, por tanto, un factor crucial a la hora de diseñar una instalación. El tiempo dirá si los sistemas centralizados ganan popularidad frente a los sistemas convencionales de expansión directa.

5 CONCLUSIONES

La lucha contra el cambio climático es uno de los temas de máxima prioridad en el mundo actualmente. En Europa, el objetivo para 2020 de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 20% se ha cumplido con éxito. Tanto ha sido así que incluso hay expectativas de superar los objetivos marcados para 2030 con un 55% en lugar de un 40% y de alcanzar la neutralidad medioambiental en 2050, en lugar de un 80% de reducción.

Las emisiones de refrigerantes son responsables de aproximadamente 3830 Mton equivalentes de CO₂ (Green Cooling Initiative, 2011). De estos, un 70.3% son emisiones indirectas y un 29.7% emisiones directas. Este dato pone de manifiesto que, además de reducir el impacto asociado a las fugas de refrigerantes fluorados, es crucial apostar por fuentes renovables y mejorar la eficiencia energética de las instalaciones. Si solo nos centramos en una de las variables de la ecuación, quizás el esfuerzo que está realizando el sector de la refrigeración y la climatización no produzca finalmente el efecto esperado.

Para reducir el impacto directo de las instalaciones frigoríficas la comunidad internacional acordó en 2016 la Enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal. El objetivo es reducir progresivamente la cantidad de HFC comercializados hasta alcanzar un porcentaje de reducción de un 85%. Diferentes países han ratificado este Acuerdo aprobando distintos Reglamentos nacionales o comunitarios que establecen los mecanismos para alcanzar sus objetivos:

- La Unión Europea aprobó el Reglamento 517/2014 o F-Gas.
- Japón cuenta con la Act on Rational Use and Proper Management of Fluorocarbons de 2015.
- Canadá con su Regulations Amending the Ozone-depleting Substances and Halocarbon Alternatives Regulations de 2017.
- Australia reforzó su Ozone Protection and Synthetic Greenhouse Gas Management Act en 2017.
- Estados Unidos, si bien aun no ha ratificado la Enmienda de Kigali, sí está regulando los HFC mediante el programa SNAP.
- China tan solo cuenta con recomendaciones por sectores a corto y largo plazo para apostar por refrigerantes menos contaminantes.

Estos Reglamentos suelen actuar de dos maneras. La primera es estableciendo unas hojas de ruta para vetar a los gases refrigerantes de alto GWP en aplicaciones donde el estado de la tecnología permita alternativas de menor impacto medioambiental en el corto plazo. Estos objetivos son diferentes en cada territorio (ver Tabla 12). Tal y cómo se comentó en el apartado 2.3.7 esto se debe a que estas restricciones están adaptadas a la situación de cada país: los sectores más contaminantes, la tecnología más extendida y el estado de la nueva tecnología desarrollada, entre otros factores. La primera medida busca incentivar el desarrollo de tecnología medioambientalmente más sostenible. La segunda, establecida en la Unión Europea, Canadá y Australia, es establecer un sistema de cuotas para forzar a cumplir los objetivos de reducción de la Enmienda de Kigali. De esta manera, se pasa el problema a los importadores de gases y equipos cargados, y se les fuerza a reducir su consumo de HFCs mediante tecnología libre de ellos o gases regenerados.

Los refrigerantes alternativos a los HFC son más peligrosos desde el punto de vista de la seguridad de las personas. Para reemplazar los HFC por estos gases – HFC de bajo GWP, HFO y refrigerantes naturales- es necesario disponer de una tecnología que trabaje con baja carga y minimice las fugas. Evidentemente, es crucial que los Reglamentos nacionales de seguridad permitan el uso de estos refrigerantes en cargas suficientes. Además, los estándares internacionales de equipos deben estar armonizados con esta normativa para que no haya barreras en ninguna de las dos direcciones.

Se han analizado y comparado las normas de seguridad EN 378:2016 y ASHRAE 15. La primera es una norma europea, pero representativa de la ISO 5149:2014 que es de aplicación internacional. La segunda es propia de los Estados Unidos. También se han comentado los tres estándares de seguridad verticales más importantes: el IEC 60335-2-24 para refrigeración doméstica, el IEC 60335-2-40 para aparatos de climatización residencial y

el IEC 60335-2-89 para equipos autónomos de refrigeración comercial. Por último, se han tratado algunos Reglamentos nacionales.

Se han definido una serie de casos de estudios representativos del sector. Del estudio de las cargas máximas permitidas por los reglamentos y los estándares internacionales se pueden extrapolar las tendencias y hacia donde se dirige las aplicaciones de refrigeración y climatización. En la Tabla 35 se comparan la tecnología actual con la potencial tecnología futura. Dicha tecnología está ya permitida por los Reglamentos de seguridad.

En refrigeración domésticas el GWP está ya limitado a 150 en Europa y estará restringido a 630 a partir de 2021 en Estados Unidos. Esto prohíbe el uso del refrigerante más común en estos equipos que es el R-134a. La alternativa, ya extendida en muchos lugares del mundo, son los hidrocarburos, principalmente el R-600a. Los estándares verticales de aplicación tanto en Europa como en Estados Unidos no permiten más de 150 gramos en hidrocarburos, aunque esto es suficiente para el rango de potencias habitual de estos sistemas. En Europa, la normativa horizontal permite cargas muy superiores, por lo que es menos restrictiva que el standard vertical, mientras que en el ASHRAE 15 estadounidense los hidrocarburos están, en principio, prohibidos sin autorización previa. No obstante, como la EPA sí permite el uso de hidrocarburos en cantidades inferiores a 150 gramos no hay ninguna barrera real para su uso. Sí conviene destacar que el ASHRAE 15 permite una carga mínima bastante alta de 3 kg para los refrigerantes que no pertenezcan a las clases A3 y B3, como sería el caso del R-1234ze(E), lo que abre la puerta a su uso en estos equipos cuando la potencia requerida sea alta.

En refrigeración comercial encontramos diferentes sistemas: equipos autónomos, unidades de condensación remota y centrales frigoríficas.

- Los equipos autónomos, es decir, frigoríficos y congeladores comerciales verán limitado el GWP a 150 en Europa a partir de 2022. En Estados Unidos la limitación en aplicación desde 2020 es menos estricta, de 630 en frigoríficos y 1510 en congeladores. En cualquier caso, el R-404A está prohibido. El R-134a tan solo podría seguir empleándose en congeladores comerciales en Estados Unidos. Al igual que ocurre en la refrigeración doméstica, la alternativa más sólida son los hidrocarburos. También igual a como ocurrió en el caso anterior, los estándares verticales no permiten más de 150 gramos. Sin embargo, la última versión del estándar internacional IEC 60335-2-89 sí permite hasta 500 gramos. En el caso de Europa el estándar horizontal sí está preparado para permitir estas cargas, mientras que en Estados Unidos el ASHRAE 15 prohíbe los hidrocarburos y la EPA tan solo permite 150 gramos.
- En las unidades de condensación remota las alternativas al R-134a y R-404A son el R-744, el R-152a, el R-717 y los hidrocarburos. Con respecto al R-744 las cargas permitidas son más que suficientes tanto en Europa como en Estados Unidos, aunque hay que resaltar que la carga permitida en el segundo es un 46% inferior a la del primero. Justo lo contrario ocurre con el R-152a, es un 23% mayor en Estados Unidos y no tiene una cota máxima de 3.38 kg como sí ocurre en Europa. Las cargas permitidas para el amoníaco en estos sistemas son demasiado bajas. Por último, los hidrocarburos están prohibidos en Estados Unidos y permitidos con cargas bajas de unos pocos kilogramos en Europa.
- Las centrales frigoríficas pueden ser directas, indirectas o en cascada. El R-404A está prohibido ya en estos sistemas y se buscan alternativas de menor GWP para el R-134a. Para el sector de baja el mejor refrigerante es el R-744, permitido en cargas suficientes tanto por la norma EN 378:2016 como por el ASHRAE 15. Para el sector de alta, aunque a corto plazo se seguirá empleando R-134a, es posible emplear R-744 en ciclos transcíticos, R-717, R-152a y, solo en Europa, los hidrocarburos.

En refrigeración industrial de cámaras frigoríficas se utilizan sistemas compactos, llamados monoblock, y sistemas semicompactos. Tradicionalmente se emplean HFC y R-717. La tendencia será a abandonar los HFC en favor del R-717, que no tiene problemas desde el punto de vista de la legislación para estas instalaciones. También es posible emplear hidrocarburos, tanto en Estados Unidos como en Europa, aunque en esta última las cargas son considerablemente inferiores a las permitidas para el amoníaco.

Tabla 35. Tendencias actuales y futuras de los diferentes sectores de la tecnología frigorífica

Sector	Tecnología actual	Tecnología futura
Refrigeración doméstica	<ul style="list-style-type: none"> - Frigoríficos y congeladores con R-134a 	<ul style="list-style-type: none"> - Frigoríficos y congeladores con hidrocarburos, principalmente, R-600a. Las cargas no superarán los 150 gramos. Para equipos de gran potencia puede utilizarse R-1234ze(E).
Refrigeración comercial	<ul style="list-style-type: none"> - Frigoríficos y congeladores con R-134a y R-404A - Unidades de condensación remota con R-134a y R-404A - Centrales de expansión directa con R-134a y R-404A 	<ul style="list-style-type: none"> - Frigoríficos y congeladores con hidrocarburos, aunque cargas limitadas a 150 gramos. R-134a permitido en congeladores comerciales en Estados Unidos. - Unidades de condensación remota con R-744 y, solo en Estados Unidos, R-152a - Sistemas de refrigeración en cascada con R-744 en baja. En alta se utilizará a corto plazo R-134a y, más adelante, R-717 o hidrocarburos (en Europa)
Refrigeración industrial	<ul style="list-style-type: none"> - Sistemas monoblock y semicompactos con HFC y R-717 	<ul style="list-style-type: none"> - Sistemas monoblock y semicompactos de R-717
Climatización	<ul style="list-style-type: none"> - Aparatos Split de R-410A - Aparatos portátil de R-410A - Rooftop de R-410A - Sistemas VRF de R-410A - Enfriadoras de R-410A 	<ul style="list-style-type: none"> - Aparatos Split de R-32, los hidrocarburos están limitados a baja potencia. Hay problemas en Estados Unidos con su standard de producto, pero se prevé que se solucione a corto plazo. - Aparatos portátiles de hidrocarburos - Rooftop de R-32 o, en Europa, hidrocarburos - Sistemas VRF con R-32. - Enfriadoras de R-1234ze(E) y R-32 y, en un futuro, R-717. Hay problemas para los hidrocarburos.

En el sector de la climatización el refrigerante más empleado era el R-410A, pero estará prohibido por las restricciones en el GWP. En sistemas de expansión directa los principales refrigerantes alternativos son el R-32 y los hidrocarburos. El R-32 no tendrá problemas en aparatos Split, portátiles o compactos horizontales. En Europa se permiten hasta 12 kg, mientras que la EPA lo reduce a 8 kg. Con respecto al R-290 la carga máxima en ambas normas es de 1 kg, lo que según las estimaciones de Life Front (2018) y EPA (2019e) permiten hasta 10 kW de potencia y climatizar superficies de hasta 200 m². Los hidrocarburos son la alternativa escogida para los aparatos de aire acondicionado portátiles. Para equipos rooftop se podrá emplear R-32 y, solo en Europa, hidrocarburos. Para sistemas VRF en grandes edificios la norma europea abre la puerta a construir sistemas de hasta 59 kg de R-32 a través de un método alternativo de cálculo de la carga, mientras que la estadounidense mantiene el procedimiento tradicional con cargas mucho menores. En sistemas centralizados con enfriadoras de agua el R-32, el R-1234ze(E) y el R-717 no tienen problemas, mientras que los hidrocarburos solo son posibles en Europa. Urge armonizar el estándar vertical estadounidense con el IEC 60335-2-40 y actualizar el ASHRAE 15 para permitir el uso de hidrocarburos en equipos instalados al aire libre.

Se observa que en las aplicaciones de refrigeración – doméstica, comercial e industrial – la tendencia es hacia refrigerantes naturales como los hidrocarburos, el R-744 y el R-717. De hecho, esta tecnología es prácticamente una realidad hoy en día. Sin embargo, en el sector de la climatización, el R-410A se va a reemplazar principalmente por el R-32, que es un HFC con GWP de 675. Si bien a largo plazo se podría desarrollar la tecnología para utilizar refrigerantes naturales, como los hidrocarburos, en climatización, quizás no sea necesario. Se podría cumplir con los objetivos de la Enmienda de Kigali aun empleando R-32 en climatización si se hace una transición efectiva a los refrigerantes naturales en el resto de los sectores.

Además, siempre es posible emplear HFC regenerados. El gas refrigerante ya no es un bien infinito por lo que algunas empresas, como Daikin, están impulsando planes de economía circular. En lugar de destruir el gas refrigerante una vez termine la vida útil del aparato o instalación, su principio son las 3R: recuperar el refrigerante, regenerarlo y reutilizarlo. El mayor parque de refrigerantes disponibles se encuentra ahora mismo en las propias instalaciones y equipos. Los gases regenerados quedan fuera de los sistemas de cuotas, pues solo se contabiliza la primera vez que se comercializó el gas. Además, son los únicos refrigerantes que pueden emplearse con un GWP mayor de 2500 para el mantenimiento y reparación. En España, el impuesto a los gases fluorados está aminorado en un 50% para estos gases [Daikin, 2020a)]. Hay que resaltar que los refrigerantes regenerados tienen la misma calidad que un refrigerante virgen, cumpliendo con las exigencias de calidad y pureza de la norma AHRI 700. El proceso de regeneración consiste en separar el refrigerante del aceite lubricante, eliminar la humedad y separar los gases incondensables y otras impurezas [Gas Servei, 2020].

ANEXO A. CARACTERÍSTICAS DE LOS PRINCIPALES REFRIGERANTES

Se incluye en este anexo una tabla con las propiedades de interés en este trabajo para cada uno de los refrigerantes mencionados en este documento. Se incluye la clase de seguridad, su punto de ebullición a presión atmosférica en °C, su peso molecular en g/mol, el ODP en kg equivalentes de R-11, el GWP en kg equivalentes de CO₂ a 100 años, el Límite de Exposición de Toxicidad Aguda (ATEL) en ppm, el Límite de Anoxia (ODL) en ppm, el Límite Inferior de Inflamabilidad (LFL) en ppm y el Límite de Concentración de Refrigerante (RCL) tanto en ppm como en kg/m³. Los últimos cuatro parámetros se han tabulado a partir de los valores mostrados en las normas ISO 817:2014 y EN 378:2016.

Refrigerante	Categoría	Clase Seguridad	Punto ebullición 101.3 kPa [°C]	PM [g/mol]	ODP [kg equivalentes R-11]	GWP [kg equivalentes CO2 a 100 años]	ATEL [ppm]	ODL [ppm]	LFL [ppm]	RCL [ppm]	RCL [kg/m3]
R-11	CFC	A1	24	137.4	1	4750	1100	140000	0	1100	0.0062
R-12	CFC	A1	-29	120.9	1	10900	18000	140000	0	18000	0.0888
R-22	HCFC	A1	-41	86.5	0.055	1810	59000	140000	0	59000	0.2083
R-134a	HFC	A1	-26	102	0	1430	50000	140000	0	50000	0.2082
R-507A	HFC	A1	-46.7	98.6	0	3985	130000	140000	0	130000	0.5232
R-513A	HFC bajo GWP	A1	-29.05	108.4	0	631.4	72000	140000	0	72000	0.3186
R-404A	HFC	A1	-46.5 a -45.7	97.6	0	3922	130000	140000	0	130000	0.5179
R-407A	HFC	A1	-45.2 a -38.7	90.1	0	2107	83000	140000	0	83000	0.3052
R-407B	HFC	A1	-46.8 a -42.4	102.9	0	2804	79000	140000	0	79000	0.3318
R-407C	HFC	A1	-43.8 a -36.7	86.2	0	1774	81000	140000	0	81000	0.2850
R-407F	HFC	A1	-46.1 a -39.7	82.1	0	1825	95000	140000	0	95000	0.3183
R-410A	HFC	A1	-51.6 a -51.5	72.6	0	2088	170000	140000	0	140000	0.4149
R-422D	HFC	A1	-43.2 a -38.4	109.9	0	2729	63000	140000	0	63000	0.2826
R-426A	HFC	A1	-28.5 a -26.7	101.6	0	1508	20000	140000	0	20000	0.0829
R-442A	HFC	A1	-52.7 a -46.5	81.8	0	1888	100000	140000	0	100000	0.3339
R-448A	HFC	A1	-45.9 a -39.8	86.28	0	1387	110000	140000	0	110000	0.3874
R-449A	HFC	A1	-46 a -39.9	87.21	0	1397	100000	140000	0	100000	0.3560
R-450A	HFC bajo GWP	A1	-23.4 a -22.8	108.67	0	604.7	72000	140000	0	72000	0.3194
R-452A	HFC	A1	-47 a -43.2	103.51	0	2140	100000	140000	0	100000	0.4225
R-245fa	HFC bajo GWP	B1	15	134	0	1030	34000	140000	0	34000	0.1860
R-32	HFC bajo GWP	A2L	-52	52	0	675	220000	140000	145000	29000	0.0616
R-1234yf	HFO	A2L	-26	114	0	4	100000	140000	60000	12000	0.0558
R-1234ze(E)	HFO	A2L	-19	114	0	7	59000	140000	65000	13000	0.0605
R-152a	HFC bajo GWP	A2	-25	66	0	124	50000	140000	48000	9600	0.0259
R-744	Natural	A1	-78	44	0	1	40000	140000	0	40000	0.0718
R-717	Natural	B2	-33	17	0	0	320	140000	167000	320	0.0002

Refrigerante	Categoría	Clase Seguridad	Punto ebullición 101.3 kPa [°C]	PM [g/mol]	ODP [kg equivalentes R-11]	GWP [kg equivalentes CO2 a 100 años]	ATEL [ppm]	ODL [ppm]	LFL [ppm]	RCL [ppm]	RCL [kg/m3]
R-290	Natural	A3	-42	44	0	3	50000	140000	21000	4200	0.0075
R-600a	Natural	A3	-12	58.1	0	3	25000	140000	18000	3600	0.0085
R-1270	Natural	A3	-48	42.1	0	2	1000	140000	27000	1000	0.0017
R-441A	Natural	A3	-41.9 a -20.4	48.3	0	3.5	3200	140000	16200	3200	0.0063
R-443A	Natural	A3	-44.8 a -41.2	43.47	0	2.5	1700	140000	20290	1700	0.0030

Tabla 36. Propiedades de los principales refrigerantes

ANEXO B. TABLAS PARA EL CÁLCULO DE LA CARGA MÁXIMA PERMITIDA SEGÚN NORMA EN 378:2016

En este anexo se adjuntan las dos tablas necesarias para determinar la carga máxima en el procedimiento establecido en la norma EN 378:2016 y que ha sido detallado en el apartado 3.2. La Tabla A se utiliza para determinar la carga máxima por toxicidad. La Tabla B se emplea para determinar la carga máxima por inflamabilidad. Se han obtenido estas tablas del Real Decreto 552/2019 por el que se aprueba el Reglamento de Seguridad de las Instalaciones Frigoríficas y sus instrucciones técnicas complementarias.

Tabla 37. Requisitos de límites de carga para refrigerantes basados en toxicidad [Real Decreto 552/2019]

CATEGORÍA DE TOXICIDAD	CATEGORIA DEL LOCAL POR ACCESIBILIDAD		TIPO DE UBICACIÓN DE LOS SISTEMAS			
			1	2	3	4
A	A		Límite toxicidad x volumen del local o apéndice 4		Sin límites de carga (a)	Los requisitos de carga por toxicidad tendrán que evaluarse según las categorías de los locales por ubicación de los sistemas 1,2 o 3 dependiendo de la ubicación de la envolvente ventilada
	B	Plantas superiores sin salidas de emergencia o sótanos	Límite toxicidad x volumen del local o apéndice 4			
		Otros	Sin límites de carga (a)			
	C	Plantas superiores sin salidas de emergencia o sótanos	Límite toxicidad x volumen del local o apéndice 4			
		Otros	Sin límites de carga (a)			
B	A		Para sistemas de absorción o adsorción sellados: límite de toxicidad x volumen del local y no más de 2,5 kg. Resto de sistemas: límite de toxicidad x volumen del local		Sin límites de carga (a)	
	B	Plantas superiores sin salidas de emergencia o sótanos	Límite de toxicidad x volumen del local	Carga máx. 25 kg (a)		
		Densidad de personal inferior a 1 persona por 10m ²	Carga máx. 10 kg	Sin límites de carga (a)		
		Otros		Carga máx. 25 kg (a)		
	C	Densidad de personal inferior a 1 persona por 10m ²	Carga no mayor de 50 kg (a) y salidas de emergencia existentes.	Sin límites de carga (a)		
		Otros	Carga máx. 10 kg (a)	Carga máx. 25 kg (a)		
a) Para aire exterior aplicar límite de toxicidad por volumen del local punto 3.3.2 de IF-04 y para salas de máquinas IF-07						

Tabla 38. Requisitos de límite de carga para refrigerantes basados en inflamabilidad [Real Decreto 552/2019]

Categoría de inflamabilidad	Categoría del local por accesibilidad		Tipo de ubicación de los sistemas				
			1	2	3	4	
2L	A	Confort humano	Según apéndice 3 pero no superior a $m_2^a \times 1,5$ o según apéndice 4 pero no superior a $m_3^b \times 1,5$		Sin límite de carga ^c	Carga de refrigerante no superior a $m_3^b \times 1,5$	
		Otras aplicaciones	20% x LII x volumen del local pero no más de $m_2^a \times 1,5$ o según apéndice 4 y no superior a $m_3^b \times 1,5$				
	B	Confort humano	Según apéndice 3 pero no superior a $m_2^a \times 1,5$ o según apéndice 4 pero no superior a $m_3^b \times 1,5$				
		Otras aplicaciones	20% x LII x volumen del local pero no más de $m_2^a \times 1,5$ o según apéndice 4 y no superior a $m_3^b \times 1,5$	20% x LII x volumen del local y no más de 25 kg ^c o según apéndice 4 pero no más de $m_3^b \times 1,5$			
	C	Confort humano	Según apéndice 3 pero no superior a $m_2^a \times 1,5$ o según apéndice 4 pero no superior a $m_3^b \times 1,5$				
		Otras aplicaciones	20% x LII x volumen del local pero no más de $m_2^a \times 1,5$ o según apéndice 4 y no superior a $m_3^b \times 1,5$	20% x LII x volumen del local y no más de 25 kg ^c o según apéndice 4 pero no más de $m_3^b \times 1,5$			
Inferior a 1 persona por cada 10 m ²		20% del LII x volumen del local y no más de 50 kg ^c o según apéndice 4 y no más de $m_3^b \times 1,5$	Sin límites de carga ^c				
2	A	Confort humano	Según apéndice 3 pero no más de m_2^a		Sin restricciones ^c	Carga de refrigerante no superior a m_3^b	
		Otras aplicaciones	20% x LII x volumen del local pero máximo m_2^a				
	B	Confort humano	Según apéndice 3 pero no más de m_2^a				
		Otras aplicaciones	20% x LII x volumen del local pero máximo m_2^a				
	C	Confort humano	Según apéndice 3 pero no más de m_2^a				
		Otras aplicaciones	Sótanos	20% x LII x volumen del local pero máximo m_2^a			
		Plantas superiores	20% del LII x volumen del local pero máx 10 kg ^c	20% del LII x volumen del local pero máx 25 kg ^c			
Categoría de inflamabilidad	Categoría del local por accesibilidad		Tipo de ubicación de los sistemas				
			1	2	3	4	
3	A	Confort humano	Según apéndice 3 y no más del valor mayor de m_2 o 1,5 kg		No más de 5kg ^c	Carga del refrigerante no mayor de m_3^b	
		Otras aplicaciones	En sótanos	Solo sistemas sellado: 20% x LII x volumen del local y no más de 1kg			
			Sobre nivel terreno	Solo sistemas sellados 20% x LII x volumen del local y no más de 1,5kg			
	B	Confort humano	Según apéndice 3 y no más del valor mayor de m_2 o 1,5 kg		No más de 10 kg ^c		
		Otras aplicaciones	En sótanos	20% del LII por volumen del local y no más de 1 kg ^a			
			Sobre nivel terreno	20% del LII por volumen del local y no más de 2,5kg			
	C	Confort humano	Según apéndice 3 y no más del valor mayor de m_2 o 1,5 kg		Sin restricciones ^c		
		Otras aplicaciones	En sótanos	20% del LII por volumen del local y no más de 1 kg ^c			
			Sobre nivel terreno	20% x LII x volumen del local y no más de 10 kg ^c			20% x LII x volumen del local y no más de 25 kg ^c
a) $m_2 = 26 \text{ m}^3 \times \text{LII}$ b) $m_3 = 130 \text{ m}^3 \times \text{LII}$ c) Para aire exterior aplicar límite de toxicidad por volumen del local punto 3.3.2 de IF-04 y para salas de máquinas IF-07							

REFERENCIAS

ANSI/ASHRAE Standard 15-2019. Safety Standard for Refrigeration Systems

ANSI/ASHRAE Standard 34-2019. Designation and Safety Classification of Refrigerants

Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale relatif aux conditions d'exploitation des installations de réfrigération 29.11.2018 [consulta: junio 2020]. Disponible en: http://www.ejustice.just.fgov.be/cgi_loi/change_lg.pl?language=fr&la=F&table_name=loi&cn=2018112911

Arrêté du Gouvernement wallon déterminant les conditions intégrales et sectorielles relatives aux installations fixes de production de froid ou de chaleur mettant en oeuvre un cycle frigorifique 28.09.2007 [consulta: junio 2020]. Disponible en: http://www.ejustice.just.fgov.be/mopdf/2007/09/28_2.pdf#Page138

Arrêté du Gouvernement wallon tendant à prévenir la pollution lors de l'installation et la mise en service des équipements frigorifiques fixes contenant de l'agent réfrigérant fluoré, ainsi qu'en cas d'intervention sur ces équipements, et à assurer la performance énergétique des systèmes de climatisation 28.09.2007 [consulta: junio 2020]. Disponible en: http://www.ejustice.just.fgov.be/cgi_loi/change_lg.pl?language=fr&la=F&table_name=loi&cn=2007071256

Australian Government, 2018. HFC phase-down [consulta: abril 2020]. Disponible en: <https://www.environment.gov.au/protection/ozone/hfc-phase-down>

Bitzer, 2018. Refrigerant Report 20 [consulta: mayo 2020]. Disponible en: <https://www.bitzer-refrigerantreport.com/>

BGBI n° 305/1969 [consulta: mayo 2020]. Disponible en: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10008237>

Caloryfrio, 2020. Informe de mercado de la climatización 2019 [consulta: abril 2020]. Disponible en: <https://www.caloryfrio.com/noticias/informacion-mercado/informe-mercado-climatizacion-aire-acondicionado.html>

Climatización y Confort, 2020. Carrier: la gama 30XB/P-ZE de AquaForce ya está disponible con HFO R-1234ze [consulta: junio 2020]. Disponible en: <https://climatizacion-y-confort.cdecomunicacion.es/productos/38533/carrier-gama-30xb-p-ze-aquaforce-ya-esta-disponible-hfo-r-1234ze>

COMISIÓN EUROPEA, 2015. National Codes, Standards and legislation of EU Member States with respect to F-Gas alternatives [consulta: mayo 2020]. Disponible en: https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/f-gas/legislation/docs/codes_standards_legislation_en.pdf

COMISIÓN EUROPEA, 2020. F-Gas Consultation Forum [consulta: marzo 2020]. Disponible en: https://ec.europa.eu/clima/events/articles/0106_es

CONGRESS.GOV, 2019. American Innovation and Manufacturing Act of 2019 [consulta: marzo 2020]. Disponible en: <https://www.congress.gov/bill/116th-congress/senate-bill/2754/text>

Contracting Business, 2020. The Path to a Safe Refrigerant Transition [consulta: mayo 2020]. Disponible en: <https://www.contractingbusiness.com/refrigeration/article/21123283/path-to-safe-refrigerant-transition>

Cornel Law School, 1992. 40 CFR Part 82 - Protection of stratospheric ozone [consulta: abril 2020]. Disponible en: <https://www.law.cornell.edu/cfr/text/40/part-82>

Decreto de 25 de junio de 1980 apartado CH 35 [consulta: mayo 2020]. Disponible en: https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexteArticle.do;jsessionid=F0799AEA9726C07732B1468A0BFC88D0.tplgfr31s_2?idArticle=LEGIARTI000038485354&cidTexte=LEGITEXT000020303557&dateTexte=20191007

DDGUV 100-500 Sección 2.35 [consulta: mayo 2020]. Disponible en: <https://www.arbeitssicherheit.de/schriften/dokument/0:5372531,40.html>

a) Daikin, 2020. Closing the loop: Creating a circular economy for HVAC-R industry [consulta: junio 2020]. Disponible en: https://www.daikin.eu/en_us/knowledge-center/building-a-circular-economy.html

b) Daikin, 2020. Daikin presenta en Copenhague el nuevo mini VRV 4 con refrigerante R32 [consulta: junio 2020]. Disponible en: https://www.daikin.es/es_es/prensa/2020/nota-de-prensa-374-daikin-presenta-en-copenhague-el-vrv-5-r-32.html

Danfoss, 2018. Refrigerant options now and in the future.

Danfoss, 2019. Reducción gradual del uso de HFC [consulta: marzo 2020]. Disponible en: <https://www.danfoss.com/es-es/about-danfoss/our-businesses/cooling/refrigerants-and-energy-efficiency/hfc-phase-down/>

EPA, 2015. Rule April 10, 2015 [consulta: abril 2020]. Disponible en: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2015-04-10/pdf/2015-07895.pdf>

a) EPA, 2017. Clean Air Act Text [consulta: abril 2020]. Disponible en: <https://www.epa.gov/clean-air-act-overview/clean-air-act-text>

b) EPA, 2017. Overview of SNAP [consulta: abril 2020]. Disponible en: <https://www.epa.gov/snap/overview-snap>

c) EPA, 2017. Retail Food Refrigeration [consulta: abril 2020]. Disponible en: <https://www.epa.gov/snap/retail-food-refrigeration>

d) EPA, 2017. Substitutes in Chillers [consulta: abril 2020]. Disponible en: <https://www.epa.gov/snap/substitutes-chillers>

EPA, 2018. Substitutes in Refrigeration and Air Conditioning [consulta: marzo 2020]. Disponible en: <https://www.epa.gov/snap/substitutes-refrigeration-and-air-conditioning>

a) EPA, 2019. SNAP Regulations [consulta: abril 2020]. Disponible en: <https://www.epa.gov/snap/snap-regulations>

b) EPA, 2019. Substitutes in Household Refrigerators and Freezers [consulta: abril 2020]. Disponible en: <https://www.epa.gov/snap/substitutes-household-refrigerators-and-freezers>

c) EPA, 2019. Substitutes in Industrial Process Refrigeration [consulta: abril 2020]. Disponible en: <https://www.epa.gov/snap/substitutes-industrial-process-refrigeration>

d) EPA, 2019. Substitutes in MVAC [consulta: abril 2020]. Disponible en: <https://www.epa.gov/snap/substitutes-mvac-passenger-air-conditioning-light-duty-medium-duty-heavy-duty-and-road-vehicles>

e) EPA, 2019. Substitutes in Residential and Light commercial Air conditioning and Heat Pumps [consulta: abril 2020]. Disponible en: <https://www.epa.gov/snap/substitutes-residential-and-light-commercial-air-conditioning-and-heat-pumps>

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: marzo 2020]. Disponible en: https://www.gas-servei.com/images/Restricciones_F_GAS.pdf

Gas Servei, 2020. Gestión de residuos [consulta: junio 2020]. Disponible en: <https://www.gas-servei.com/servicios/gestion-de-residuos/>

Gazette, 2017. Regulations Amending the Ozone-depleting Substances and Halocarbon Alternatives Regulations [consulta: abril 2020]. Disponible en: <http://www.gazette.gc.ca/rp-pr/p2/2017/2017-10-18/html/sor-dors216-eng.html>

Green Cooling Initiative, 2020. Country Data [consulta: mayo 2020]. Disponible en: <https://www.green-cooling-initiative.org/country-data/>

Industria Formazione, 2017. International special issue 2016-2017 [consulta: mayo 2020]. Disponible en:

https://issuu.com/marcobuoni/docs/international_special_issue_2016_20

INTARCON, 2018. F-Gas Consultation Forum [consulta: marzo 2020]. Disponible en: <https://www.intarcon.com/f-gas-consultation-forum/>

INTARCON, 2019. Efectos del Reglamento F-Gas [consulta: marzo 2020]. Disponible en: <https://www.intarcon.com/efectos-reglamento-f-gas-fabricacion-equipos/>

a) INTARCON, 2020. El valor de la cadena de frío [consulta: abril 2020]. Disponible en: <https://www.intarcon.com/el-valor-de-la-cadena-de-frio/>

b) INTARCON, 2020. La importancia de la refrigeración en los alimentos [consulta: abril 2020]. Disponible en: <https://www.intarcon.com/refrigeracion-en-los-alimentos/>

c) INTARCON, 2020. Refrigeración y conservación de medicamentos [consulta: abril 2020]. Disponible en: <https://www.intarcon.com/refrigeracion-y-conservacion-de-medicamentos/>

d) INTARCON, 2020. Plantas enfriadoras Ammolite [consulta: mayo 2020]. Disponible en: <https://www.intarcon.com/plantas-enfriadoras-nh3-ammolite/>

e) INTARCON, 2020. Sistemas de refrigeración directos e indirectos [consulta: abril 2020]. Disponible en: <https://www.intarcon.com/sistemas-de-refrigeracion-directos-e-indirectos/>

INTERNATIONAL CODE COUNCIL, 2018. INTERNATIONAL MECHANICAL CODE 2018.

Johnson Controls, 2020. York YVWH: nueva enfriadora de tornillo [consulta: junio 2020]. Disponible en: https://author.johnsoncontrols.com/es_es/novedades/noticias/york-yvwh-nueva-enfriadora-de-tornillo

JRAIA, 2018. Current status of Japan's legislation on F-gases and RACHP using Low-GWP Refrigerants.

Ley 16/2013, de 29 de octubre, por la que se establecen determinadas medidas en materia de fiscalidad medioambiental y se adoptan otras medidas tributarias y financieras.

LG, 2020. Aire acondicionado Split [consulta: junio 2020]. Disponible en: <https://www.lg.com/es/aire-acondicionado-split>

Life Front, 2018. Impact of standards on hydrocarbon refrigerants in Europe.

Ministry of the Economy, Trade and Industry, Japan, 2019. Japan's Policies of fluorocarbons management (refrigerant transition) [consulta: mayo 2020]. Disponible en: https://www.jraia.or.jp/english/side/presentation3_2019.pdf

Real Decreto 552/2019, de 27 de septiembre, por el que se aprueban el Reglamento de seguridad para instalaciones frigoríficas y sus instrucciones técnicas complementarias.

REGLAMENTO (UE) N.º 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.º 842/2006.

Rodríguez de Arriba, P.E. (2018). Fluidos refrigerantes: análisis de la situación actual. (Trabajo Fin de Grado Inédito). Universidad de Sevilla, Sevilla.

Ammonia21, 2019. HFC tax, natural refrigerant incentives adopted in France [consulta: junio 2020]. Disponible en: http://www.ammonia21.com/articles/8765/hfc_tax_natural_refrigerant_subsidies_adopted_in_france

Skatteministeriet, 2018. Ley de CFC-Fiscal [consulta: abril 2020]. Disponible en: <https://www.skm.dk/skattetal/satser/satser-og-beloebsgraenser/cfc-afgiftsloven>

Teknologie impianti, 2019. Utilizzo dell'R32, il punto della situazione dopo la pubblicazione del DECRETO 23 novembre 2018 [consulta: mayo 2020]. Disponible en: <https://www.teknologieimpianti.it/2019/01/17/approfondimenti/utilizzo-dellr32-il-punto-della-situazione-dopo-la-pubblicazione-del-decreto-23-novembre-2018/>

The Norwegian Tax Administration. HFC and PFC tax [consulta: abril 2020]. Disponible en: <https://www.skatteetaten.no/en/business-and-organisation/vat-and-duties/excise-duties/about-the-excise-duties/hfc-and-pfc/>

The World Bank, 2019. HFC gas emissions 2010 [consulta: abril 2020]. Disponible en:

<https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.HFCG.KT.CE?view=map>

Toshiba, 2020. R-32 products [consulta: junio 2020]. Disponible en: <https://www.toshiba-aircon.co.uk/products/R32-products/>

Underwriters Laboratories, 2017. Revisiting flammable refrigerants.

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 selección.

UNE-EN 60335-2-24:2011. Requisitos particulares para aparatos de refrigeración, aparatos fabricantes de helados y fabricantes de hielo.

UNE-EN 60335-2-40:2005. Requisitos particulares para bombas de calor eléctricas, acondicionadores de aire y deshumidificadores.

UNE-EN 60335-2-89: 2010. Requisitos particulares para aparatos de refrigeración para uso comercial con una unidad de condensación de fluido refrigerante o un compresor incorporado o a distancia.

a) UNEP, 2019. Clasification of Parties [consulta: marzo 2020]. Disponible en: <https://ozone.unep.org/classification-parties>

b) UNEP, 2019. Data Centre [consulta: marzo 2020]. Disponible en: <https://ozone.unep.org/countries/data-table>

c) UNEP, 2019. La Enmienda de Kigali (2016) [consulta: abril 2020]. Disponible en: <https://ozone.unep.org/treaties/montreal-protocol/amendments/kigali-amendment-2016-amendment-montreal-protocol-agreed>

d) UNEP, 2019. The Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer [consulta: marzo 2020]. Disponible en: <https://ozone.unep.org/treaties/montreal-protocol>

VLAREM II, Arkitel 5.16.3.3 [consulta: mayo 2020]. Disponible en: <https://navigator.emis.vito.be/mijn-navigator?woId=8983>