



Master Universitario en Sistemas Ferroviarios

TRABAJO FIN DE MASTER

FUTURO DE LOS GASES REFRIGERANTES EN TRENES DE RENFE

Autor: María Jesús Carnero Miranda.

Director: Eliseo Pascual Contreras.

Madrid, 4 de julio de 2018

FICHA DE TRABAJO FIN DE MASTER

Datos del alumno:

M^a Jesus Carnero Miranda

Datos del director del Trabajo:

Eliseo Pascual Contreras, Jefe de Área de Ingeniería de Mantenimiento Renfe.

Programa cursado: Master de Sistemas Ferroviarios, 2016-2018

Título del Trabajo Fin de Máster:

FUTURO DE LOS GASES REFRIGERANTES EN TRENES DE RENFE

Resumen de ideas desarrolladas:

La entrada en vigor de nueva normativa medioambiental para lograr la reducción de los gases de efecto invernadero hace necesario el cambio de refrigerante de los equipos de aire acondicionando evolucionando hacia un sistema no contaminante.

El objeto general de este trabajo es asegurar el suministro de gas refrigerante para el funcionamiento de los equipos embarcados en los trenes en condiciones óptimas. Por otro lado queremos reducir emisiones de CO₂, cumplir los compromisos medioambientales adquiridos y reducir el aumento de costes por la subida de precio que se produce tras la puesta en marcha de la nueva normativa.

Con el trabajo se realiza un análisis de la situación del parque de Renfe ante el problema presentado en los equipos de aire acondicionado. Resumimos el seguimiento de las iniciativas que plantea el sector para poder analizar la solución óptima en la explotación. Por otra parte tenemos en prueba alternativa en dos vehículos de los cuales se podrá ver el comportamiento a la hora de asegurar la fiabilidad en explotación del equipo.

Finalmente planteamos un análisis de cargas térmicas para la toma de decisión respecto a la bajada de rendimiento del equipo buscando que el cambio no afecte al confort, se busca encontrar el equilibrio económico sin que el viajero note disminución de prestaciones.

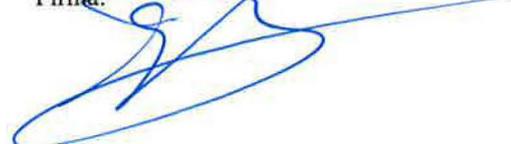
Alumno: M^a Jesus Carnero Miranda

Firma:



Director: Eliseo Pascual Contreras

Firma:



INDICE

	Pág
1. INTRODUCCIÓN Y RESUMEN.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN A LOS GASES REFRIGERANTES	1
1.1.1 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LOS GASES REFRIGERANTES	1
2. OBJETIVOS DEL TRABAJO.....	5
2.1 PROBLEMA PRESENTADO	5
3. TAREAS Y PLANIFICACIÓN	11
4. DESARROLLO DEL ANÁLISIS.....	12
4.1. SITUACIÓN DEL PARQUE.....	12
4.2. ANALISIS DE INICIATIVAS DEL SECTOR	13
4.3. SEGUIMIENTO DE ALTERNATIVAS PARA EQUIPOS CON R134A Y R407C.....	18
4.3.1 SELECCIÓN DE EQUIPO.....	18
4.3.2 PLAN DE PRUEBAS EN LABORATORIO	21
4.4 PRUEBAS EN TREN	22
4.4.1 REQUERIMIENTOS A COMPROBAR.....	22
4.5. ANALISIS PARA TRASLADAR LAS MEDIDAS A TODO EL PARQUE DE RENFE	29
5. CONCLUSIONES.....	33
6. APORTACIONES.....	34
7. BIBLIOGRAFIA.....	35

1. INTRODUCCIÓN Y RESUMEN

La entrada en vigor de nueva normativa medioambiental para lograr la reducción de los gases de efecto invernadero hace necesario el cambio de refrigerante de los equipos de aire acondicionado evolucionando hacia un sistema no contaminante.

El trabajo pretende analizar los problemas presentados en el ferrocarril tras la entrada en vigor de la nueva normativa relativa a los gases refrigerantes. Comenzamos viendo la situación del parque de Renfe para dimensionar el alcance del problema y las actuaciones a realizar.

Continuamos viendo las iniciativas del sector para intentar encontrar una solución que disminuya el incremento de costes actuales y sea trasladable al mayor número de vehículos posible dentro del parque de Renfe.

1.1 INTRODUCCIÓN A LOS GASES REFRIGERANTES

Los gases refrigerantes son fluidos de transporte que conducen la energía calorífica desde el nivel a baja temperatura (evaporador) al nivel de alta temperatura (condensador), donde pueden ceder su calor.

Estos gases refrigerantes son el fluido frigorígeno que contiene una instalación frigorífica y cuya misión es la de absorber calor de la fuente fría a baja presión y temperatura para cederlo a la fuente caliente a alta presión y temperatura, todo ello con las correspondientes variaciones de estado de líquido a vapor y de vapor a líquido.

1.1.1 Características básicas de los gases refrigerantes

En la normativa se habla de gases fluorados con un determinado potencial de calentamiento atmosférico.

«**Potencial de calentamiento atmosférico**» o «**PCA**»: es el potencial de calentamiento climático de un gas de efecto invernadero respecto al del dióxido de carbono (CO₂), calculado en términos de potencial de calentamiento a lo largo de 100 años de un kilogramo de gas de efecto invernadero respecto al de un kilogramo de CO₂, según lo dispuesto en los anexos I, II y IV, o, por lo que respecta a las mezclas, calculado según lo dispuesto en el anexo IV

Por tanto se habla de un “potencial de calentamiento”, o sea, lo que puede aportar al calentamiento atmosférico en comparación con lo que aporta el CO₂ que toma el valor de 1.

Así, por ejemplo, el gas R404A tiene un PCA de 3922 que quiere decir que en potencia 1 kilogramo de este gas es 3922 veces más perjudicial que 1 kg de CO₂.

Por otro lado se habla del **GWP (Global Warming Potential)** ó Potencial de Calentamiento Global (PCG) es un número que representa los efectos combinados de los diferentes tipos de gases de efecto invernadero que están en la atmósfera y su efecto relativo en la absorción de la radiación infrarroja de salida.

Inicialmente se definía en base al gas CFC-11 (conocido como Halocarbón GWP ó también HGWP). El CFC-11 tiene una vida finita y conocida en la atmósfera, por lo que el HCWP se puede cuantificar.

Del CO₂ no se conoce su vida total en la atmósfera, por eso el GWP basado en el CO₂ se mide en un horizonte de tiempo determinado, por ejemplo 20, 100 ó 500 años. En resumen, el PCA es el GWP medido con referencia al CO₂ a 100 años

Características que definen un refrigerante:

- Baja temperatura de ebullición: Un punto de ebullición por debajo de la temperatura ambiente, a presión atmosférica.
- Fácilmente manejable en estado líquido: El punto de ebullición debe ser controlable con facilidad de modo que su capacidad de absorber calor sea controlable también.
- Alto calor latente de vaporización: Cuanto mayor sea el calor latente de vaporización, mayor será el calor absorbido por kilogramo de refrigerante en circulación.
- No inflamable, no explosivo, no tóxico.
- Químicamente estable: A fin de tolerar años de repetidos cambios de estado.
- No corrosivo: Para asegurar que en la construcción del sistema puede usarse materiales comunes y la larga vida de todos los componentes.
- Moderadas presiones de trabajo: Las elevadas presiones de condensación (mayores de 30kg/cm²) requieren un equipo extrapesado. La operación en vacío (menor de 0Kg/cm²) introduce la posibilidad de penetración de aire en el sistema.
- Fácil detección y localización de fugas: Las fugas y pérdidas de gas producen la disminución del refrigerante y la contaminación del sistema y medio ambiente.
- Inocuo para los aceites lubricantes o refrigerantes: La acción del refrigerante en los aceites lubricantes no debe alterar la acción de lubricación.
- Bajo punto de congelación: La temperatura de congelación tiene que estar muy por debajo de cualquier temperatura a la cuál pueda operar el evaporador.
- Alta temperatura crítica: Un vapor que no se condense a temperatura mayor que su valor crítico, sin importar cuál elevada sea la presión. La mayoría de los refrigerantes poseen temperaturas críticas superiores a 93°.
- Moderado volumen específico de vapor: Para reducir al mínimo el tamaño del compresor.

- Bajo coste: A fin de mantener el precio del equipo dentro de lo razonable y asegurar el servicio adecuado cuando sea necesario.

Los gases refrigerantes se destacan por tener un punto de ebullición bajo, un punto de condensación bajo y adicionalmente el punto crítico más alto posible para hacer más eficiente el proceso de evaporación. Se clasifican de varios modos, según su seguridad, su inflamabilidad y por su estructura molecular, veamos todas sus clasificaciones con más detalle.

- Grupo de alta seguridad (L1): En esta clasificación encontramos los refrigerantes R11, R113, R114, R12, R502, R22, R500, R410A, R407C, R424..., estos refrigerantes se caracterizan por ser refrigerantes no inflamables y de acción tóxica ligera o nula.

- Grupo de media seguridad (L2): En este grupo podemos encontrar al Amoníaco, Cloruro de etilo, Cloruro de metilo, Dióxido de azufre, sus características destaca la posibilidad de resultar inflamables, corrosivos, tóxicos o explosivos en un porcentaje en volumen igual o superior al 3,5% en mezcla de aire.

- Grupo de baja seguridad (L3): Estos refrigerantes son muy inflamables y explosivos mezclados con aire a un porcentaje inferior en volumen de 3,5%. A causas de su bajo costo se utilizan donde el peligro está siempre presente y su uso no agrega otro peligro, como por ejemplo en plantas petroquímicas y refinerías de petróleo, otra de sus características principales es la necesidad de trabajo a una mayor presión que la presión atmosférica para evitar que aumente el peligro de explosión debido a la imposibilidad de penetración de aire al circuito. En este grupo se pueden incluir el butano, propano, isobutano, etano, etileno, propileno y metano.

Grupo de seguridad

	Altamente Inflamable	A3	B3
	Ligeramente Inflamable	A2	B2
	No inflamable	A1	B1
		Baja Toxicidad	Alta Toxicidad

↑ ↑
Inflamabilidad creciente

→ →
Toxicidad creciente

Fig. 1: Clasificación de seguridad de gases

Clasificación según su estructura molecular

Según su estructura molecular los gases refrigerantes se clasifican en 3 grandes grupos, los CFC, HCFC y los HFC.

- Refrigerantes CFC (clorofluorcarbonos)

Son los refrigerantes que contienen cloro, flúor y carbono en su molécula como el R-12 (2 átomos de cloro) y el R-11 (3 átomos de cloro).

Los conocidos como clorofluorcarbonos fueron prohibidos tanto su venta como su uso el 1 de octubre del año 2000 por el Reglamento Europeo CE nº 2037/2000, por ser sustancias que agotan o destruyen la capa de Ozono (CFC12 y CFC11)

- Refrigerantes HCFC (Hidroclorofluorcarbonos)

Son los refrigerantes que contienen hidrógeno, cloro (un solo átomo), flúor y carbono como el refrigerante R-22.

Fueron prohibidos el 1 de enero del año 2004 para su uso en cuanto a la fabricación de equipos tanto de frío como de bomba de calor y prohibido su uso en todos los casos, incluido el mantenimiento a partir del 1 de enero del 2015 según el Reglamento Europeo CE nº 2037/2000, por ser sustancias que destruyen y agotan la capa de ozono.

- Refrigerantes HFC (Hidrofluorcarbonos)

Son los refrigerantes que no contienen cloro, pero contienen hidrógeno, flúor y carbono en su estructura molecular. En este grupo de refrigerantes podemos encontrar al R404A, R407A, R407C, R410A, etc...

Los HFC son gases “mezcla” esto quiere decir que están compuestos por la mezcla de varios gases o sustancias puras, estos a su vez se pueden separar en 2 grandes grupos y un subgrupo (mezclas zeotrópicas o no azeotrópicas, mezclas Azeotrópicas y mezclas casi azeotrópicas) las mezclas no azeotrópicas y casi azeotrópicas deben ser cargados en estado líquido.

Evolución de los refrigerantes

Antes la situación actual de los refrigerantes, la prohibición de los CFC y de los HCFC, las familias de refrigerantes que HFC puros o mezclas son la alternativa actual a la sustitución a largo plazo de estos refrigerantes con base de cloro, no obstante se están barajando otras alternativas

los refrigerantes naturales como el amoníaco, los hidrocarburos lineales o cíclicos y sus mezclas, el CO₂ y el agua (algunos de estos ya están siendo utilizados desde largo tiempo en instalaciones industriales o de gran capacidad).

2. OBJETIVOS DEL TRABAJO

El objeto general de este trabajo es asegurar el suministro de gas refrigerante para el funcionamiento de los equipos embarcados en los trenes en condiciones óptimas. Por otro lado queremos reducir emisiones de CO₂, cumplir los compromisos medioambientales adquiridos y disminuir los costes actuales que nos afectan con las subidas de precios.

Más concretamente nos centramos en realizar el seguimiento de las alternativas propuestas por el fabricante de los equipos embarcados. Buscamos tener una solución que se pueda extender a la gran mayoría de los equipos.

2.1 PROBLEMA PRESENTADO

La Decisión 2002/358/CE del Consejo, de 25 de abril de 2002, relativa a la aprobación, en nombre de la Comunidad Europea, del Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y al cumplimiento conjunto de los compromisos contraídos con arreglo al mismo. Este documento obliga a la Comunidad y a sus Estados miembros a reducir el conjunto de sus emisiones antropogénicas de los gases de efecto invernadero enumerados en el anexo A del Protocolo de Kyoto en un 8 % respecto de los niveles de 1990, en el período comprendido entre 2008 y 2012. La falta de coordinación en la aplicación de dichos compromisos entraña el riesgo de que se creen barreras a la libre circulación de vehículos de motor en la Comunidad.

Por otro lado dentro de las prohibiciones el Reglamento 517/2014 indica que quedará prohibido a partir del 1 de enero de 2020 el uso de gases fluorados de efecto invernadero con un potencial de calentamiento atmosférico igual o superior a 2500, para revisar o efectuar el mantenimiento de aparatos de refrigeración con un tamaño de carga de 40 toneladas equivalentes de CO₂ o más.

El presente apartado no se aplicará a equipos militares ni a aparatos destinados a enfriar productos a temperaturas por debajo de - 50 °C.

Hasta el 1 de enero de 2030, la prohibición no se aplicará a las dos categorías de gases fluorados de efecto invernadero siguientes:

- Los gases fluorados de efecto invernadero regenerados, con un potencial de calentamiento atmosférico igual o superior a 2500, usados para el mantenimiento o la revisión de aparatos de refrigeración existentes, siempre que dichos gases hayan sido etiquetados con la información sobre el número de lote y el nombre y la dirección del centro de regeneración o reciclado.
- Los gases fluorados de efecto invernadero reciclados, con un potencial de calentamiento atmosférico igual o superior a 2.500, usados para el mantenimiento o la revisión de aparatos de refrigeración existentes, siempre que dichos gases se hayan recuperado de tales aparatos. Estos gases reciclados solo podrán ser usados por la empresa que haya realizado la recuperación como parte del mantenimiento o la revisión, o por la empresa para la que se haya realizado la recuperación como parte del mantenimiento o la revisión. La prohibición contemplada no se aplicará a aparatos de refrigeración para los cuales se haya autorizado una exención.

El Reglamento 517/2014 sobre gases fluorados entró en vigor con las primeras consecuencias prácticas en enero de 2015, con el objetivo de reducción gradual de los hidrofluorocarburos (HFC) en casi un 80% para el año 2030.

Años	Porcentaje para calcular la cantidad máxima de hidrofluorocarburos que pueden ser comercializados y cuotas correspondientes
2015	100 %
2016-2017	93 %
2018-2020	63 %
2021-2023	45 %
2024-2026	31 %
2027-2029	24 %
2030	21 %

Fig.2: Tabla de reducción de cuotas de gases

A partir de 2015 la suma total de las cuotas de HFC asignadas a productores e importadores no puede superar la «cantidad máxima» calculada para dicho año natural. La cantidad máxima de cuotas de HFC disponibles en 2015 corresponde al 100 % de la demanda media anual para el periodo 2009-2012, unos 182,5 millones de toneladas (Tm) equivalentes de CO₂, lo cual también se denomina «línea base». La cantidad máxima o línea base se reducirá en 7 % en 2016, 37 % en 2018, 55 % en 2021, 69 % en 2024, 76 % en 2027 y 79 % en 2030. La reducción de HFC es de hecho más exigente de lo que inicialmente parece para aquellos sectores que entran dentro de su ámbito. Esto se debe a que la cantidad máxima de cuotas de HFC disponibles en el mercado se ajusta a la baja a partir del año 2018 en adelante para eliminar las cuotas de HFC en usos exentos,

estimadas en unas 8.5 Tm equivalentes de CO2 cada año. Esto hace que la carga sobre usos no exentos sea más alta de lo que en principio parece.

La reducción de HFC se define en términos de CO2 equivalente. Las toneladas métricas de HFC que pueden colocarse en el mercado europeo dependen del potencial de calentamiento global (PCG) de los HFC o de la mezcla en cuestión. Por ejemplo, un importador de 10 Tm equivalentes de CO2 de cuotas de HFC únicamente puede colocar 2,5 toneladas de HFC-404A en el mercado europeo ese año.

HFC o mezcla	Potencial de calentamiento global	Cantidad de HFC equivalentes a 10Tm de CO2 equivalentes (toneladas)
HFC-23	14800	0,6
HFC-404A	3922	2,5
HFC-227ea	3220	3,1
HFC-410A	2088	4,7
HFC-407C	1824	5,4
HFC-134A	1430	6,9
HFC-32	675	14,8
HFC-152A	124	80,6

Fig. 3- Tabla cantidad de HFC equivalente a 10Tm de CO2 equivalentes

La reducción de HFC se basó en el AnaFgas, un modelo desarrollado para el Estudio preparatorio de la Comisión Europea para el Reglamento sobre gases fluorados en la UE, el cual, entre otras cosas, trazó la demanda anual de HFC en la Unión Europea para cada año desde 2015 hasta 2030. La demanda de HFC consiste en la primera vez que se llenan nuevos equipos y en las veces que se rellenan equipos instalados. El modelo AnaFgas se basa en dos suposiciones clave: la penetración de tecnologías con bajo PCG en nuevos equipos en la medida en que sea técnica y económicamente factible, y la plena implementación de medidas de contención y recuperación. Estas suposiciones tienen importantes implicaciones sobre la disponibilidad de cuotas de HFC y los precios de los HFC en el futuro

La primera escasez considerable de cuotas de HFC ya se ha empezado a ver a finales del 2017, a medida que los equipos precargados queden incluidos en el ámbito de la reducción de HFC y las existencias de los años anteriores se agoten. En el 2018, con la exclusión de usos exentos (8,5 Tm equivalentes de CO2), el segundo paso de reducción (37 %), y el cumplimiento temprano de la

prohibición de servicio, la escasez de cuotas de HFC ya es algo serio. Con estas medidas la vida de los equipos ya instalados estaría sujeta a la disponibilidad del refrigerante.

Los principios básicos de la economía dictan que cuando la demanda supera a la oferta, los precios aumentan. Lo mismo se aplica a las cuotas de HFC, y la Comisión Europea reconoce que «tienen un valor monetario claro». Este aumento de precio para los HFC, no relacionado con cualquier aumento en los costes de fabricación de los productos fluoroquímicos en sí, se denomina como el «suplemento de precio de los HFC». Productores e importadores, ya que son los titulares de las cuotas de HFC que les permiten colocar ciertas cantidades en el mercado europeo, son los beneficiarios indiscutibles del suplemento de precio de los HFC. La Agencia Federal Alemana del Medio Ambiente (UBA, por sus siglas en alemán) ha calculado el suplemento potencial del precio de los HFC bajo condiciones que se aproximan a la reducción de HFC. Como las cuotas de HFC se conceden históricamente a un pequeño número de productores e importadores sin ningún coste, es decir, se otorgan gratuitamente, el suplemento de precio de los HFC representa un beneficio extraordinario para estas empresas que alcanza miles de millones de euros cada año.

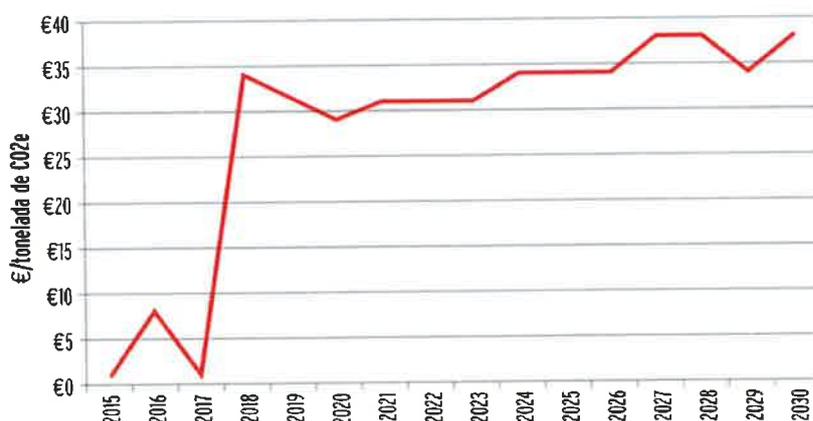


Fig. 4: Incremento de precio de la tonelada de CO2

Esta presión implantada por el mercado hace que se tenga que buscar una alternativa para mantener la vida de los equipos.

Impuestos a los refrigerantes

El Gobierno publicó en el BOE nº 260 del 30 de octubre de 2013 la Ley 16/2013 de 29 de octubre, por la que se establecen determinadas medidas en materia de fiscalidad medioambiental, donde aparece el Nuevo Impuesto que grava los Gases Refrigerantes Fluorados de Efecto Invernadero.

El 30 de diciembre en el BOE nº 312 salió el Reglamento que desarrolla y complementa los preceptos legales de la Ley, en el Real Decreto 1042/2013 de 27 de diciembre.

El tipo impositivo del impuesto vendrá determinado por el PCA (potencial de calentamiento global) de cada uno de los gases, multiplicado por 0,020 con un máximo de 100€ por kilogramo, por ejemplo:

El Gas R-32 con un PCA de 550 quedará así: $550 * 0,020 = 11€$

El impuesto sobre gases fluorados es un impuesto que grava a los hidrocarburos halogenados utilizados comúnmente en el aire acondicionado, disolventes, agentes extintores de incendios y agentes espumantes entre otros, por el negativo impacto en la atmósfera debido a su potencial de calentamiento global (PCA) y consecuente efecto invernadero.

El PCA o GWP define el efecto de calentamiento integrado a lo largo del tiempo que produce una liberación instantánea hoy, de 1 kg de un gas de efecto invernadero, en comparación al causado por el CO₂, esta medida está basada en un tiempo horizonte de 100 años.

Este impuesto solo le afectará al usuario final en el incremento del precio de la recarga, que según qué casos y dependiendo del refrigerante utilizado, tendrá un importe que puede llegar a multiplicar por hasta 12 veces el precio del propio gas, así pues y como ejemplo destacado, el gas R-404A que tiene un precio neto de unos 8 € / Kg, se le deberá de añadir en el año 2016, 75,68 € / Kg por impuesto sobre gases fluorados.

El problema lo podemos ver con la evolución de precios , tomamos datos desde 2008.



Fig. 5 - Evolución de precio del R134A desde 2008 a 2018

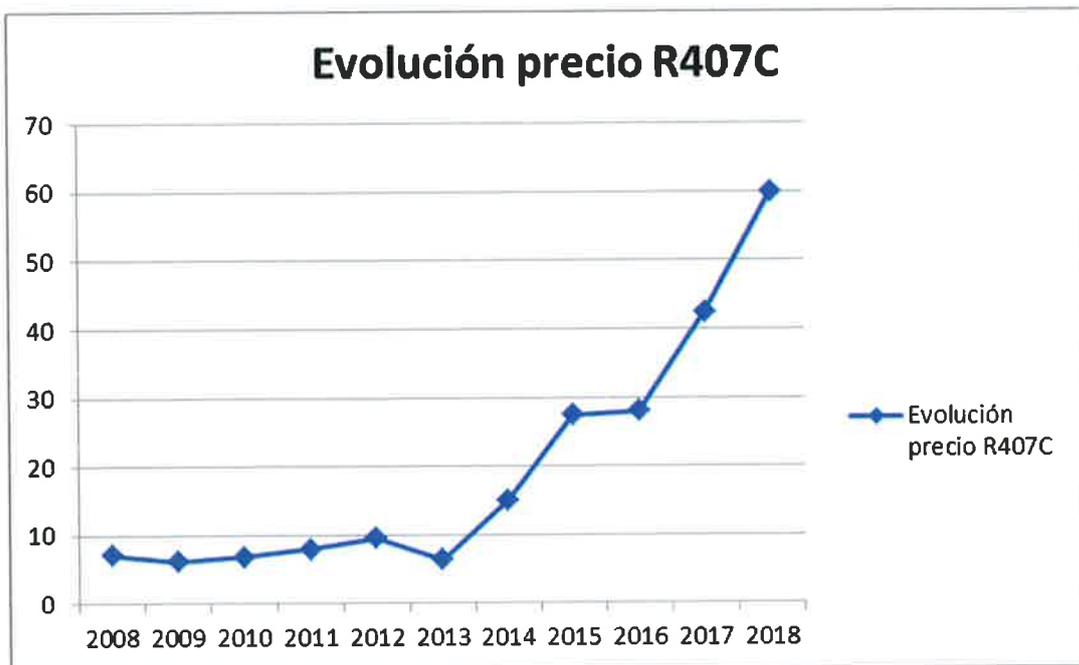


Fig. 6 - Evolución de precio del R407C desde 2008 a 2018

Como vemos en las gráficas el aumento de precio es preocupante desde 2013 ya que se ha disparado el gasto presupuestado para el suministro. El precio puede llegar a multiplicarse por 10 entre 2013 y 2018.

3. TAREAS Y PLANIFICACIÓN

Para lograr los objetivos del proyecto se han planificado las siguientes tareas:

- Analizar situación del parque
- Análisis de las iniciativas del sector
- Prueba en campo
- Análisis de parámetros para trasladar las iniciativas del sector a todo el parque de Renfe.

En la actualidad podemos dar por completados los puntos siguientes:

- Analizar situación del parque
- Análisis de las iniciativas del sector
- Análisis de parámetros para trasladar las iniciativas del sector a todo el parque de Renfe.

Se establece primer límite temporal para pruebas en campo septiembre de 2018 donde tras tener los resultados de fiabilidad tras las pruebas se podría tomar una primera conclusión y seguir con otras series.

Se pretende minimizar el número de pruebas a realizar. Se han analizado los puntos en común de los diferentes planes de mantenimiento de los trenes que permitirán ir controlando futuros cambios de refrigerante y marcar hitos.

El cambio de elementos se realiza en las operaciones R1 y R2 (cada 8 años) donde se desmontan y se sustituyen los componentes deteriorados. El cambio en este punto reducirá el coste del proceso.

En todos los planes de mantenimiento a partir de la I2 (cada mes) se comprueba sistemáticamente la funcionalidad del equipo y el nivel de refrigerante por lo que se va a controlar cualquier bajada de rendimiento. Por estos puntos comunes vemos que el seguimiento también se podría hacer dentro del plan de mantenimiento actual de todos los trenes.

En los controladores de los equipos se coloca una pegatina con la información de los refrigerantes que están cargados, en caso de tener el nuevo refrigerante lo indicará, por lo que se registrará cualquier anomalía para su estudio.

El mantenimiento de la flota de trenes es seguido por diferentes empresas el conjunto del panorama para su seguimiento lleva a contactar con diferentes agentes que nos trasladen información en el caso las empresas de mantenimiento son:

- NERTUS
- ACTREN
- IRVIA
- TALGO

4. DESARROLLO DEL ANÁLISIS

4.1. SITUACIÓN DEL PARQUE

Para este trabajo nos centramos en los equipos de aire acondicionado embarcados en los trenes de RENFE. Buscando los diferentes tipos de refrigerantes y las tecnologías presentes en todos los trenes y resumimos los datos en el siguiente esquema:

SERIE	Refrigerantes utilizados		
S/100	R134A	R407C	
S/102	R134A		
S/103	R134A		
S/104	R134A		
S/112	R134A		
S/114		R407C	
S/120		R407C	
S/121		R407C	
S/130	R134A	R407C	
S/730	R134A	R407C	
S/432	R134A		
S/446	R134A	R407C	
S/447	R134A	R407C	
S/440	R134A	R407C	
S/448	R134A		
S/449		R407C	
S/450		R407C	
S/451		R407C	
S/462	R134A		
S/463	R134A		
S/464	R134A		
S/465	R134A		
S/470	R134A	R407C	
S/490	R134A		
S/592	R134A		

SERIE	Refrigerantes utilizados			
S/593	R134A			
S/594	R134A			
S/596	R134A			
S/598		R407C		
S/599		R407C		
S/310	R134A			
S/311	R134A			
S/319	R134A			
S/321	R134A			
S/333	R134A			
S/334.0	R134A			
S/2400	R134A			
S/2600	R134A			
S/2700		R407C		
S/2900		R407C		
S/3300	R134A			
S/3500	R134A			
S/3600	R134A			
S/3800	R134A			
S/1900	R134A			
S/5300	R134A		R410	
S/5400				R422
S/5900	R134A			
S/6500			R410	

Fig 7 –Refrigerantes que se utilizan por serie de trenes

Tras ver los datos, concluimos que el 98% de los vehículos funciona con R134A y R407C, por tanto centraremos el problema en estas clases de refrigerantes.

Los equipos más modernos son compactos, es decir todos los componentes se encuentran en el mismo cofre. En los equipos antiguos la evaporadora y condensadora están separadas en diferentes situaciones. Los trenes tienen dos tipos de equipos los que van en los coches de viajeros denominados equipos de sala y los que van en la cabina de conducción (equipos de cabina).

4.2. ANALISIS DE INICIATIVAS DEL SECTOR

Se ha sondeado las alternativas que hay en el mercado analizando estudios publicados por fabricantes de componentes y equipos como Bitzer, Danfoss y Emerson.

En concreto Bitzer fabricante de compresores de los equipos de aire acondicionado presenta los siguientes datos sustituyendo los actuales refrigerantes por mezclas.

Current Refrigerants	Alternatives			
	ASHRAE Classification	Trade name		Composition (with blends)
R134a	R1234yf ^①	various		-
	R1234ze(E) ^①	various		-
	R450A	Solstice® N-13	Honeywell	R1234ze(E)/134a
	R513A	Opteon® XP10	Chemours ^⑤	R1234yf/134a
	R513B	-	Dalkin Chemical	R1234yf/134a
-	ARM-42***	Arkema	R1234yf/152a/134a	
R456A	AC5X**	Mexichem	R32/1234ze(E)/134a	
R404A/R507A* (R22/R407C*)	R448A	Solstice® N-40	Honeywell	R32/125/1234yf/1234ze(E)/134a
	R449A	Opteon® XP40	Chemours ^⑤	R32/125/1234yf/134a
	R449B***	-	Arkema	R32/125/1234yf/134a
	R460B	LTR4X**	Mexichem	R32/1234ze(E)/134a
R22/R407C	-	Solstice® N-20	Honeywell	R32/125/1234ze(E)/134a
	R444B	Solstice® L-20	Honeywell	R32/152a/1234ze(E)
R410A	R32 ^①	various		-
	R447B ^①	Solstice® L-41z	Honeywell	R32/125/1234ze(E)
	R452B ^①	Opteon® XL55	Chemours ^⑤	R32/125/1234yf
	R454B ^②	Opteon® XL41	Chemours ^⑤	R32/1234yf
	R459A ^②	ARM-71***	Arkema	R32/1234yf/1234ze(E)

Fig. 8- Alternativas presentadas por Bitzer para los refrigerantes

El sector industrial ya ha seguido pasos para enfrentarse a esta problemática lo cual se resume en estas tablas.

APLICACIÓN	RECONVERSIÓN (aceite: mineral)			RECONVERSIÓN (aceite: POE)	
	DE (situación actual)		A (reconversión)	DE (situación actual)	
	HFC	HFC	Low-GWP HFC	HFC	Low-GWP HFC
AC doméstico split <15kW	R22	R417A R424A	RS70	R407C R410A	R444B (L20) R447A (L41)
AC bomba calor >15kW Enfriadoras de agua	R22	R434A R422D	RS70	R407C R134a R410A	R450A (N13) R444B (L20) R447A (L41)
Máquinas vending Arcones frigoríficos Frigoríficos domésticos				R134a R404A	R407A R407F R442A (R550) R450A (N13) R448A (N40)
Refrigeración Comercial e Industrial Transporte Refrigerado	R22	R424A R417A R434A R422D	RS70	R134a R404A R507	407A R407F R442A (R550) R448A (N40) HDR-110
Refrigeración a baja temperatura	R12	R426A		R508 R23	
AC automoción				R134a	

Aún no disponible en el mercado.

Fig. 9 –Alternativas para refrigerantes utilizadas en la industria

APLICACIÓN	Alternativas para NUEVA INSTALACIÓN			
	Low-GWP HFC	Naturales	HFO	HFO/HFC
AC doméstico split <15kW	RS70			R444B (L20) R447A (L41)
AC bomba calor >15kW Enfriadoras de agua	RS70		R1234ze R1234yf	R450A (M13) R444B (L20) R447A (L41)
Máquinas vending Arcones frigoríficos Frigoríficos domésticos		R600a (Isobutano) R1270 (Propileno) R290 (Propano) R744 (CO ₂)	R1234yf R1234ze	
Refrigeración Comercial e Industrial Transporte Refrigerado	R407A R407F R442A (RSS0) RS70 R134a R134a/CO ₂	R717 (NH ₃) R744 (CO ₂) R600a (Isobutano) R1270 (Propileno) R290 (Propano)	R1234yf R1234ze	R450A (M13) R448A (M40) HDR-110
Refrigeración a baja temperatura				
AC automoción		CO ₂	R1234yf	

Aún no disponible en el mercado.

Fig. 10 – Alternativas para refrigerantes utilizadas en la industria, nueva instalación.

Otras alternativas probadas que encontramos son las mostradas por Danfoss para R407C

Refrigerant	Composition (wt. %)	GWP	Glide at 0°C
R-407C (base line)	52% R-134a, 25% R-125, 23% R-32	1526	6.7K
DR 3	78.5% R-1234yf, 21.5% R-32	146	7.8K
R-444B/L20	48.5% R-1234ze, 41.5% R-32, 10% R-152A	295	8.8K
R-290	100% R-290	3	0.0K

Fig. 11 – Alternativas al R407C

Pero estas alternativas con bajo GWP para el R407C se descartan por ser inflamables

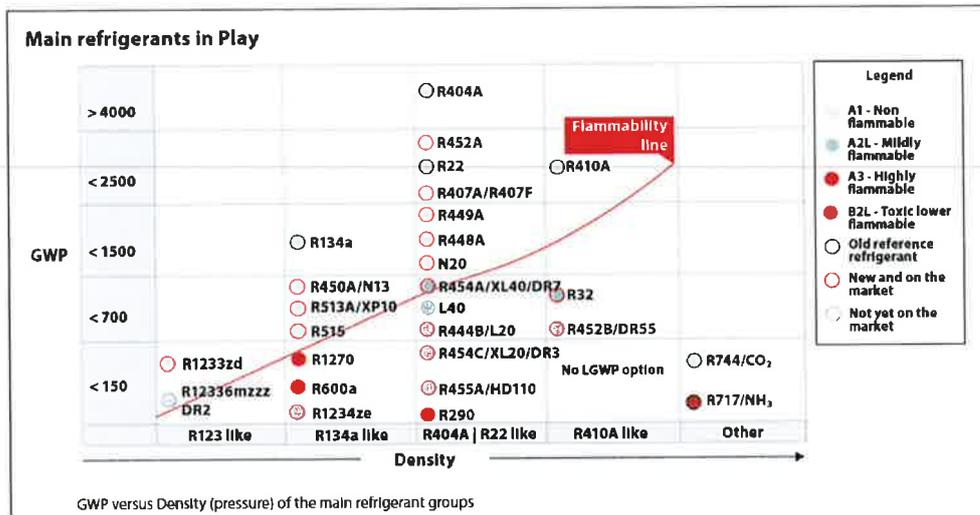


Fig. 12 – Clasificación de refrigerantes según GWP y grado de inflamabilidad

Los fabricantes de refrigerantes están optando por realizar mezclas de diferentes componentes que lleven a reducir la tasa de GWP. Chemour presenta gran gama de soluciones.

Soluciones de aire acondicionado móvil:

- Opteon™ YF (R-1234yf): para el reemplazo de R-134a en sistemas de AA en automoción.

Soluciones de aire acondicionado fijo:

- Opteon™ XP40 (R-449A): opción de reemplazo, reconversión y equipos nuevos para R-404A/R-507, R-407A/F, y R-22.
- Opteon™ XP44 (R-452A): opción de reemplazo, con temperatura de descarga casi igual, reconversión y equipos nuevos para R-404A/R-507.

- Opteon™ XP10 (R-513A): opción de reemplazo, reconversión y equipos nuevos para R-134a.
- Opteon™ XL10 (R-1234yf): reemplazo de R-134a en equipos nuevos, con capacidad y eficiencia iguales.
- Opteon™ XL20 (R-454C): reemplazo para R-22 y R-404A en equipos nuevos, <150 GWP.
- Opteon™ XL40 (R-454A): reemplazo para R-404A y R-22 en equipos nuevos; casi igual en propiedades y prestaciones.
- Opteon™ XL41(R-454B): reemplazo para R-410A en equipos nuevos; GWP muy inferior.
- Opteon™ XL55 (R-452B): reemplazo para R-410A en equipos nuevos; prestaciones mejoradas.

El fabricante de los equipos nos explica su opción de elegir:

- R134A se podría sustituir R450A ó R513A
- R407C se podría sustituir por R448A y R449A

por otra parte tenemos también equipos con R410 de los cuales vemos las siguientes alternativas

- R410 se podría sustituir por R454B, R452B

Nos centraremos en la solución dada por el fabricante de los equipos y vemos sus características:

- R134A , no es una mezcla , la identificación química sería CH₂FCF₃.
- R407C tiene estos componentes

	(% peso)
R-125	25
R-32	23
R134a	52

Veamos la composición de las alternativas propuestas R448A, R449A, R450A, R513A

Componentes	% del peso			
	R407C		R134A	
	R448A	R449A	R450A	R513A
R-32	26	24,3	0	0
R-125	26	24,7	0	0
R134a	21	25,7	42	44
R1234ze	7	0	58	0
R1234yf	20	25,3	0	56

Fig 13: Composición de la mezcla de R407C y R134Z

El GWP que se obtiene no es cercano a 0

GWP<2500 en 2020- 2030			
R407C		R134A	
GWP -1774		GWP-1430	
R448A	R449A	R450A	R513A
1387	1397	604	631

Fig 14: Comparativa de GWP de refrigerantes.

La alternativa dada para el R134A si es una solución para el 2030 pero la alternativa para R407C sólo soluciona el problema a corto plazo.

4.3. SEGUIMIENTO DE ALTERNATIVAS PARA EQUIPOS CON R134A Y R407C

4.3.1 SELECCIÓN DE EQUIPO

Para el estudio el fabricante ha comenzado con un equipo de la serie CIVIA por ser el de mayor número de unidades en servicio en el parque total de trenes.

Estos equipos compactos se encuentran situados en el techo de los vehículos mostramos el circuito que tendrían:

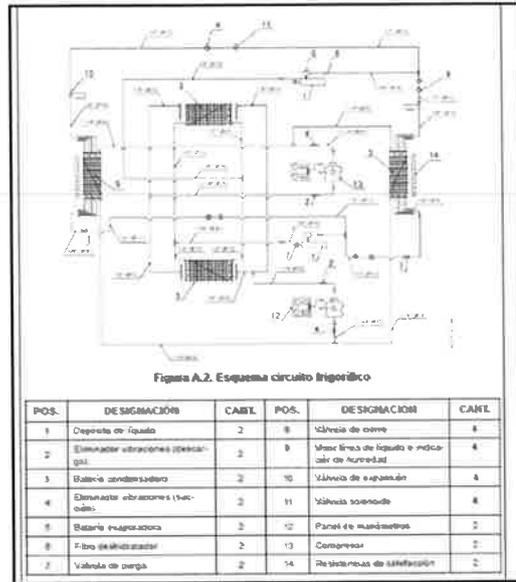


Fig 15: Esquema circuito frigorífico de CIVIA

Las características principales:

- Potencia frigorífica 32 kW.
- Potencia calefacción 20 kW.
- Caudal de aire impulsado 4800 m³/h.
- Caudal de aire exterior 800 m³/h.
- Caudal de aire de retorno 4000 m³/h.
- Refrigerante R-134a (9 kg ± 15%).
- Tensión de alimentación (equipo) 400 V, 50 Hz, 3 fases.
- Tensión de alimentación (control) 72 Vcc (25%-30%).

Los equipos con R407C con el que se ha iniciado sería el montado en la serie 599 en sala. Este equipo se encuentra situado en el techo.

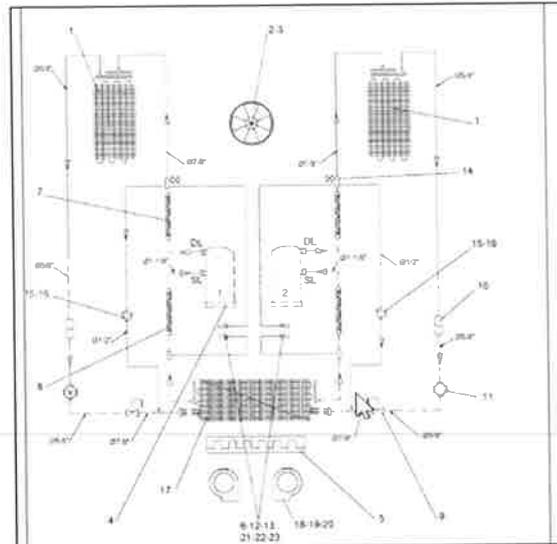


Fig.16: Esquema circuito frigorífico serie 599

- Potencia frigorífica 47 Kw $\pm 5\%$
- Caudal de aire exterior 1.050 $\pm 10\%$ m³/h
- Caudal de aire de retorno 4.850 $\pm 10\%$ m³/h
- Caudal de aire impulsado 5.900 $\pm 10\%$ m³/h
- Potencia calorífica por coche
- Equipo 30 Kw $\pm 5\%$
- Convectores 8 kW
- Resistencia WC 500 W
- Temperatura exterior 45°C
- Refrigerante R-407c (6.3 Kg por circuito $\pm 5\%$)
- Tensión de alimentación (equipo) 400 V, 50 Hz, 3 fases
- Tensión de alimentación (control) 24Vcc +25%-30%
- Peso unidad condensadora 1.075 $\pm 10\%$ Kg.

447 PMR

- Potencia frigorífica , 17500kcal/h (Tex=35°C)
- Potencia calefacción de aire 9 Kw
- Caudal de aire tratado 2900m³/h
- Caudal de aire fresco 800m³/h
- Caudal de aire recirculado 2100m³/h
- Tensión de alimentación 400V 50Hz

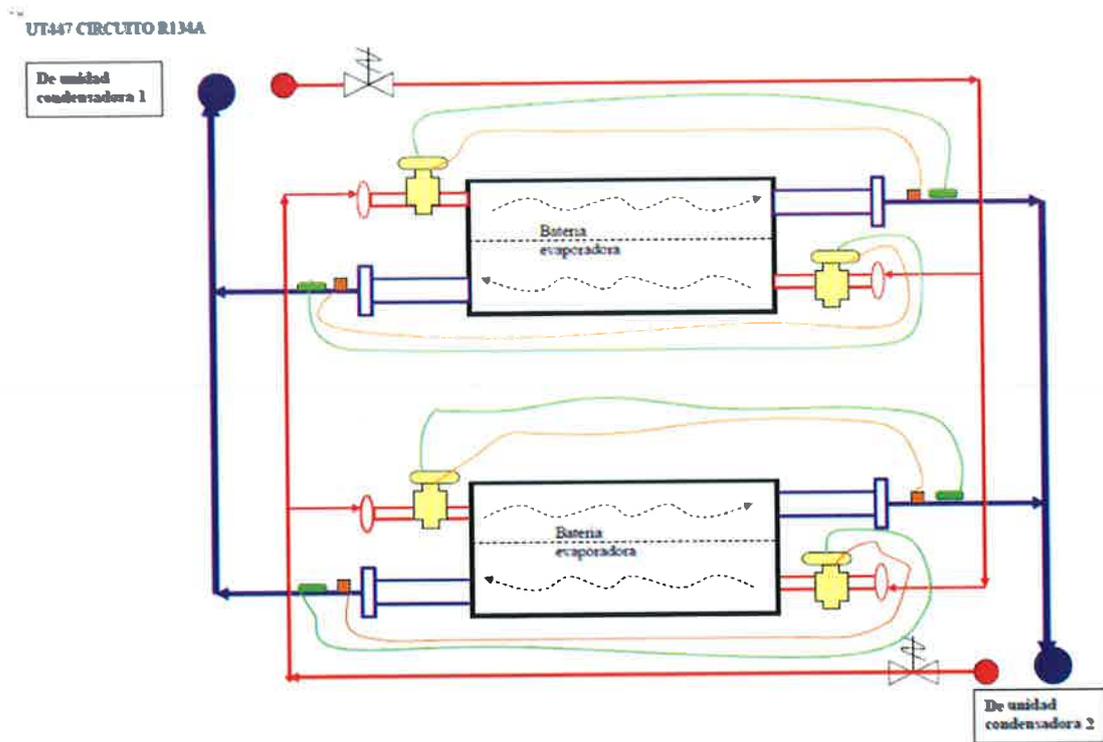


Fig. 17: Esquema circuito 447PMR

4.3.2 PLAN DE PRUEBAS EN LABORATORIO

Se comprueba la situación inicial del equipo y se compara con la situación final tras el cambio de refrigerante.

Las actuaciones incluyen las siguientes operaciones:

- Test de funcionamiento
- Eliminación de líquido y modificación de tubos , filtros , instalar manómetros
- Test de rutina
- Instalación en cámara climática
- Determinación de carga de refrigerante, condiciones nominales, condiciones de alta y baja presión y puntos de parada
- Modificación de 2 circuitos y componentes, llenado con nuevos refrigerantes
- Determinación de refrigerantes carga nominal, condiciones de alta y baja presión así como puntos de parada

El fabricante establece las modificaciones a realizar en el circuito y componentes. Adecuando todo a la cantidad y condiciones de cada refrigerante. Con estas actuaciones se compara de forma objetiva el comportamiento de las alternativas.

4.4 PRUEBAS EN TREN

4.4.1 REQUERIMIENTOS A COMPROBAR

Resumiremos los requerimientos necesarios de confort a mantener según la normativa aplicable en el sector. Los equipos deben conservar los parámetros de confort para los que se regularon inicialmente. En el caso de las aplicaciones ferroviarias tenemos las siguientes normas:

- UNE-EN 14813-1:2007 Aplicaciones ferroviarias. Aire acondicionado para cabinas de conducción. Parte 1: Parámetros de bienestar.
- UNE-EN 14813-1:2007 Aplicaciones ferroviarias. Aire acondicionado para cabinas de conducción. Parte 2: Ensayos tipo
- UNE-EN 13129-1:2003 Aplicaciones ferroviarias. Aire acondicionado para el material rodante de grandes líneas. Parte 1: Parámetros de confort.
- UNE-EN 13129-2:2005 Aplicaciones ferroviarias. Aire acondicionado para el material rodante de grandes líneas. Parte 2: Ensayos tipo.
- UNE-EN 14750-1:2007 Aplicaciones ferroviarias. Aire acondicionado para material rodante urbano y suburbano. Parte 1: Parámetros de confort.
- UNE-EN 14750-2:2007 Aplicaciones ferroviarias. Aire acondicionado para material rodante urbano y suburbano. Parte 2: Ensayos de tipo.

Estas normas dividen el material rodante en dos categorías dependiendo de la densidad de pasajeros

Criterio	Categoría A	Categoría B
Pasajeros de pie	< 4 pasajeros/m ²	≥ 4 pasajeros/m ²
Media de pasajeros al día	>20 min	≤ 20 min
Tiempo medio entre dos estaciones	> 3min	≤ 3min

Fig. 18: Categorías del material rodante según el número de viajeros.

Dependiendo de por dónde circulen los vehículos las condiciones climatológicas de operación en verano e invierno se dividen en tres zonas climáticas. La zona I puede corresponder al Sur de Europa y la II al Centro.

Los criterios de diseño para sistemas de aire acondicionado se definen según la zona climática, marcando unas condiciones de temperatura y humedad máxima a alcanzar en el interior de los vehículos.

Zonas climáticas		Vehículos de grandes líneas EN 13129-1	Vehículos Urbanos y suburbanos EN14750-1		Cabinas de conducción EN 14813-1	
Zona	Temperatura / humedad relativa; descarga solar		Categoría A	Categoría B	Categoría A	Categoría B
I	+40°C/40%;800W/m2	+27°C/51,6%	+30°C/50,0%	+32°C/57,4%	+27°C/50,0%	+30°C/60,0%
Verano						
II	+35°C/50%;700W/m2	+27°C/51,6%	+30°C/50,0%	+33°C/55,0%	+26°C/52,5%	+28°C/65,0%
III	+35°C/50%;700W/m2	+25,25°C/57,5%	+26°C/63,0%	+29°C/64,5%	+22°C/60,0%	+24°C/75,0%
I	-10 °C	+22°C	+15 °C	+10 °C	+18 °C	
Invierno						
II	-20 °C					
III	-40 °C					

Fig 19: Comparación de condiciones de diseño, temperatura máxima interior y humedad relativa en las diferentes normas.

Los parámetros de confort sobre el aire evacuado a mantener serían los siguientes:

Temperatura exterior Tem	Vehículos de grandes líneas EN 13129-1	Vehículos Urbanos y suburbanos EN14750-1		Cabinas de conducción EN 14813-1
		Category A	Category B	
Tem ≤ -20°C	10 m3/h/person	15 m3/h/person	12 m3/h/person	30 m3/h/person
-20°C < Tem ≤ -5°C	15 m3/h/persona	(En condiciones extremas el aire puede reducirse a 10 m3/h/persona)	(En condiciones extremas el aire se puede reducir a 8m3/h/persona)	
-5°C < Tem ≤ +26°C	20 m3/h/persona			
Tem > +26°C	15 m3/h/persona			

Fig. 20: Comparativa de parámetros de confort según las normas EN 13129-1 , EN 14750-1, EN14813-1.

La Temperatura y humedad varía según la zona en la que circulen los vehículos veamos los rangos donde nos encontramos tomando la información de la Agencia Estatal de Meteorología. Nos centramos en la época de verano que es en la que desarrollan mayor trabajo. La media máxima estaría en 25°C.

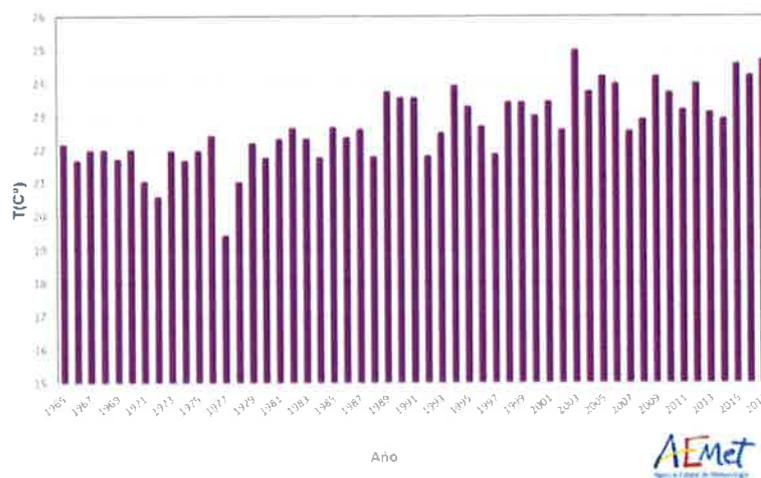


Fig.21: Serie de temperaturas medias en España en el trimestre junio-julio-agosto (1965-2017)

Las temperaturas medias históricas máximas serían 25°C y la mínima 22°C. Pero conocemos que podemos tener temperaturas puntuales cercanas a 40°C. Las ciudades con temperaturas extremas son

 Efemérides de temperatura máxima absoluta del verano (red principal)

Estación	Altitud (m)	Provincia	Máxima verano 2017		Efeméride anterior		Diferencia (°C) efeméride anterior	Datos desde
			°C	Día	°C	Fecha		
BADAJOS/TALavera LA REAL	185	BADAJOS	45,4	13-julio	44,8	01/08/2003	0,6	1955
CÁCERES	394	CÁCERES	43,2	13-julio	42,6	07/08/2005	0,6	1983
ALMAGRO / FAMET	622	CIUDAD REAL	44,2	13-julio	43,8	10/08/2012	0,4	2003
CIUDAD REAL	628	CIUDAD REAL	43,7	13-julio	43,4	24/07/1995	0,3	1971
CÓRDOBA/AEROPUERTO	90	CÓRDOBA	46,9	13-julio	46,6	23/07/1995	0,3	1959
GRANADA/AEROPUERTO	567	GRANADA	45,7	12-julio	43,1	07/07/2015	2,6	1972
GRANADA/BASE AÉREA	687	GRANADA	43,5	13-julio	42,8	29/07/1935	0,7	1931
IAÉN	580	IAÉN	44,4	13-julio	42,8	09/08/2012	1,6	1983

Fig 22: Efemérides de temperatura máxima absoluta del verano (red principal)

La distribución general de temperaturas por todo el territorio se puede ver en la figura. Entre 26 y 28°C se encontraría la gran mayoría del Sur y la zona de Barcelona. Las temperaturas extremas superiores a 28°C estarían en Córdoba.



Fig. 23: Distribución de temperaturas medias de julio en España

La humedad relativa media se encuentra en el 60% siendo la cornisa norte la zona con mayor humedad un 80%.



Fig. 24: Distribución de humedad relativa media anual en España

Una vez verificado el comportamiento del equipo desmontado, plantean la verificación en campo de los resultados obtenidos.

Nos plantean la posibilidad de realizar las pruebas en un equipo nuevo correspondiente a la modificación de 447 PMR que tiene refrigerante R134A.

Por disponibilidad se comienza con el tren 447121 por su parada en IM4, y tras esto se continúa con el tren 447171 .

Analizamos las paradas que se realizan por mantenimiento para poder hacer el seguimiento de los equipos sin aumentar el inmovilizado y sin complicar el servicio. Los vehículos siguen el plan de mantenimiento P.M.4473.30. con las siguientes operaciones:

CICLOS DE OPERACIONES DE MANTENIMIENTO

CICLO	OPERACIÓN							
	IS	IB	IM1	IM2	IM3	IM4	R	R2
Mínimo	10 D	23 D	27.500 km	130.000 km	270.000 km	560.000 km	1.125.000 km	2.250.000 km
Medio	15 D	30 D	37.500 km	150.000 km	300.000 km	600.000 km	1.200.000 km	2.400.000 km
Máximo	20 D	37 D	47.500 km	170.000 km	330.000 km	640.000 km	1.275000 km	2.550.000 km
Tiempo Límite							8 años (*)	

Fig. 25: Ciclos operaciones de mantenimiento P.M.4473.30

renfe	PLAN DE MANTENIMIENTO		465	PM465130	Página 25 de 140
	CICLOS DE OPERACIONES DE MANTENIMIENTO			Edición: 1 (15/11/2016)	Revisión: 0 (15/11/2016)

	Kilometros Recorridos			Tiempo Límite (Días)			Horas Límite		
	Mínimo	Medio	Máximo	Mínimo	Medio	Máximo	Mínimo	Medio	Máximo
IS				10	15	20			
IB				23	30	37			
IM1	27 500	37 500	47 500						
IM2	130 000	150 000	170 000						
IM3	270 000	300 000	330 000						
IM4	560 000	600 000	640 000						
R	1 125 000	1 200 000	1 275 000				8 años		
R2	2 250 000	2 400 000	2 550 000				16 años		

Fig 27: Ciclos de mantenimiento PM465130

renfe	PLAN DE MANTENIMIENTO	P.M. 5991.40	CICLO DE OPERACIONES	Nº EDICIÓN 0 03-03-2009	Nº REVISIÓN 4 31-10-2014	Página 14
--------------	------------------------------	--------------	-----------------------------	----------------------------	-----------------------------	--------------

CICLOS DE OPERACIONES DE MANTENIMIENTO									
Ciclos Periodicidad	OPERACIÓN								R2
	I1	I2	IM1	IM2	IM3	IM4	R1		
Kms	4 750 km	20 000 km	40 000 km	135 000 km	270 000 km	560 000 km	1 120 000 km	2 240 000 Km	
	6 250 km	25 000 km	50 000 km	150 000 km	300 000 km	600 000 km	1 200 000 km	2 400 000 Km	
	7 750 km	30 000 km	60 000 km	165 000 km	330 000 km	640 000 km	1 280 000 km	2 560 000 Km	
Tiempo	-	-	-	-	-	-	-	-	
	-	-	-	-	-	-	8 años	16 años	
	-	-	-	-	-	-	-	-	
Horas	-	-	-	-	-	-	-	-	
	-	-	-	-	-	-	-	-	
	-	-	-	-	-	-	-	-	

Fig 28: Ciclos de operaciones de mantenimiento P.M.5991.40

4.5. ANALISIS PARA TRASLADAR LAS MEDIDAS A TODO EL PARQUE DE RENFE

Para tener la visión conjunta de la situación planteamos inicialmente un análisis de cargas térmicas por coche de varias series.

Esto nos permite ver el trabajo que necesitan desarrollar los vehículos y ver el margen de variación que tenemos para no afectar al confort con el cambio de refrigerante.

Calculamos las ganancias de calor siguiendo las siguientes fórmulas:

Ganancias por radiación + Ganancias internas + Ganancias por ventilación

Ganancias por radiación

Para los días más cálidos

$$(S_{\text{ventanas}(1)} \times FS_{\text{cristal}} \times Rad_{\text{solar}}) + ((S_{\text{costado}(1)} \times \Delta t + 16) + ((S_{\text{techo}} \times 0.80) \times \Delta t + 25)) \times Coef_{t.\text{calor}}$$

Para cualquier día del año

$$(S_{\text{ventanas}(2)} + S_{\text{costado}(2)} + ((S_{\text{techo}} \times 0.20) + S_{\text{piso}}) \times Coef_{t.\text{calor}} \times \Delta t)$$

$$m^2 \times \frac{W}{m^2 \times ^\circ C} \times C = W = \frac{Wh}{h}$$

Ganancias internas

$$\frac{Pot_{\text{iluminación}}}{\eta} + \frac{Pot_{\text{evaporadores}}}{\eta} + n^{\circ} \text{ personas} \times (Q_{\text{sensible}} + Q_{\text{latente}})$$

$$\frac{W}{\eta} + \frac{W}{\eta} + n^{\circ} \text{ personas} \times \left(\frac{W}{\text{persona}} + \frac{W}{\text{persona}} \right) = W = \frac{Wh}{h}$$

Q latente = 46,34 W/persona

Q sensible = 69,38 W/persona

Dentro de los cálculos no tenemos en cuenta la potencia de la evaporadora, no consideramos el calor que puedan desprender estos equipos.

Ganancias por infiltración y ventilación

$$Q_{\text{aire}} \times n^{\circ} \text{ personas} \times ((\Delta t \times ByPass_{\text{factor}} \times Factor_{\text{térmico}}) + (\Delta h \times ByPass_{\text{factor}} \times Factor_{\text{humectación}}))$$

$$Q_{\text{aire}} = 15 \frac{m^3}{h \text{ persona}}$$

Tomamos como referencia los parámetros de equipo de la serie 102 y hacemos el análisis comparativo.

Parámetros del tren necesarios para los cálculos		
Superficie ventana (2 costados)	m ²	135.12
Superficie costado (2 costados)	m ²	662.84
Superficie techo	m ²	385.732
Superficie piso	m ²	385.732
Potencia iluminación por coche	W	1000
Rendimiento	%	100
Potencia evaporadores por coche	W	550
nº de evaporadores		2
Rendimiento	%	100
nº viajeros		319
Parámetros para el cálculo de las ganancias		
Factor Solar	$\frac{\%}{m^2}$	0.45
Radiación solar	$\frac{W}{m^2}$	900
Coefficiente de transmisión de calor	$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$	1.6
Caudal aire de entrada verano	$\frac{m^3}{viagiero}$	1.5
Caudal aire de entrada invierno	$\frac{m^3}{viagiero}$	20
Factor ByPass (infiltración)	%	0.15
Factor ByPass (ventilación)	%	0.85
Factor térmico	$\frac{W}{m^3 \cdot ^\circ C}$	0.335
Incremento de humedad específica verano	$\frac{g/vagiero}{kg\ aire seco}$	11.77
Factor humectación	$\frac{W}{m^3 \cdot \frac{g/vagiero}{kg\ aire seco}}$	0.82
Incremento temperatura días muy cálidos (40°C-22°C)	°C	15
Incremento temperatura días muy fríos (0°C-22°C)	°C	22
Calor sensible/persona	$\frac{W}{persona}$	69.38
Calor latente/persona	$\frac{W}{persona}$	46.36

Fig. 29. Parámetros serie 102 para cálculo de cargas térmicas.

Para los cálculos consideramos un incremento de temperatura en días cálidos de 15°C y un incremento de humedad específica de 11,77. Esto varía según la zona climática pero tomamos una referencia para comparar los vehículos.

Se considera para los cálculos la superficie del coche motor y el mayor número de pasajeros posibles. En la tabla mostramos el resumen de los datos y resultados. Comparamos la potencia instalada en los vehículos y las calorías a evacuar en el servicio.

En la tabla se ve que la potencia instalada por coche y vehículo es similar en trenes de alta velocidad y media distancia. Para las cercanías tenemos una potencia frigorífica inferior pero la carga térmica es mayor debido al incremento del número de personas que viajan en estos trenes respecto a otros servicios.

Serie	599	598	449	446	447	447P1MR	CIWIA	103	104	114	120	121
Potencia frigorífica por equipo	47	46	43	17	21	20	44	40	47	47	50	24
Equipos por coche	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	2
Potencia frigorífica instalada sala Kw	47	46	43	34	42	40	44	40	47	47	50	48
Carga térmica calculada de la sala Kw	25	28	14	34	33	33	33	22	25	25	25	26
Longitud coche motor	25,85	25,43	22,86	25,48	25,48	25,48	22,40	25,68	27,60	27,60	27,90	27,90
Longitud coche remolque	24,28	23,48	17,75	25,04	24,32	24,32	17,35	24,78	25,90	25,90	25,78	25,78
Ancho	2,71	2,71	2,71	2,71	2,71	2,71	2,71	2,71	2,41	2,41	2,41	2,41
Altura piso	1,3	1,30	1,30	1,30	1,15	1,15	1,15	1,15	1,25	1,25	1,22	1,22
Altura tren	4,302	4,17	4,30	4,19	3,75	3,75	4,26	3,89	4,123	4,2	4,2	4,2
Longitud de Cabina	3,50	3,50	3,50	3,50	2,60	2,60	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50
Superficie paredes	249,50	240,92	222,46	241,94	231,68	231,68	221,86	238,43	242,03	244,96	248,61	248,61
Superficie de paredes sin cristales	187,12	180,69	166,84	181,46	173,76	173,76	166,40	178,82	181,53	183,72	186,46	186,46
Volumen CM	182	171	157	172	161	161	159	165	167	171	175	175
Volumen CR	197,53	182,62	144,31	195,73	171,32	171,36	146,23	183,96	179,33	184,14	185,15	185,15
				6 personas/m2								
Plazas A1	68	55	60	199	199,00	199,00	199,00	30	55	55	55	76
Plazas A4	53	74	56		150,00	150,00	165,00	50	26	26	26	80
Plazas A3			28+1PMR					55	76	76	76	50
Plazas A5			56									
Plazas A2	64	60	60		150,00	150,00	199,00		80	80	80	76
Potencia media de iluminación por coche Kw	2,1	2,10	2,10	2,93	1,60	1,60	1,60	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63
Superficie acristalada	62,37	60,23	55,61	60,49	57,92	57,92	55,47	59,61	60,51	61,24	62,15	62,15
Radiación por paredes (0,8Kcal/h m2) (1,6 verano)	5988,0	5782,1	5339,0	5806,6	5560,4	5560,4	5324,7	5722,3	5808,8	5878,9	5966,7	5966,7
Carga por iluminación Pot(kw) x860 (Kcal/h)	1806	1806	1806	2523	1376	1376	1376	2258	2258	2258	2258	2258
Carga térmica por persona 118 (Kcal/h)	7552,0	8732,0	7080,0	23482,0	23482,0	23482,0	23482,0	5900,0	8968,0	8968,0	8968,0	5900,0
Carga térmica por renovación de aire	13928,0	16104,3	2304,3	7680,9	7642,5	7642,5	7642,5	11969,4	11969,4	11969,4	11969,4	16539,5
Calor total Kcal/h	29274,0	32424,4	16529,2	39492,1	38060,9	38060,9	37825,2	25849,2	29003,7	29073,8	29161,6	30663,7
P en w	25171,12	27879,98	14212,59	33957,14	32726,46	32726,46	32523,78	22226,30	24938,69	24998,98	25074,45	26366,05

Fig. 30. Tabla de cálculo de cargas térmicas

5. CONCLUSIONES

Según el resultado obtenido en las primeras pruebas de funcionamiento de los equipos de la serie 447PMR, no se ha encontrado ningún cambio en las condiciones de confort de los pasajeros.

Los trenes circularán por las líneas de cercanías de Barcelona con unas condiciones climáticas particulares, aunque estamos teniendo este año temperaturas inferiores a otros veranos, tendremos que ver su evolución en julio y agosto.

Estas condiciones climáticas donde se prueba podrían ser trasladables a otros puntos del territorio ya que los gradientes térmicos serían similares pero el contenido de humedad que afecta a los equipos sería mayor, esto da a la prueba gran validez de extrapolación de resultados al resto del territorio.

Cataluña estaría dentro de la misma zona climática de refrigeración que el sur de España por temperaturas a excepción de ciertos puntos más interiores con temperaturas extremas como son Córdoba, Granada, Jaén.

Las peores condiciones de humedad en Cataluña respecto a Andalucía lo hacen el mejor sitio para realizar la prueba ya que es otro parámetro que podría ir en contra a la hora de alcanzar las condiciones de confort.

La industria presenta alternativas claras para los refrigerantes R134A pero no tanto para el R407C del cual existen numerosos vehículos.

Tras el cálculo de cargas térmicas podemos ver que en los trenes de alta velocidad y media distancia el equipo tiene mayor margen de potencia que nos permite más posibilidades de seleccionar el refrigerante más económico sin penalizar el confort de los viajeros.

Los trenes de cercanías no tienen tanta potencia instalada y unido al mayor número de viajeros que llevan les hace más sensibles a la bajada de rendimiento a causa del cambio de refrigerante.

Esto nos da la herramienta para elegir el refrigerante más adecuado ponderando la disponibilidad y precio en el mercado frente a la bajada posible de rendimiento de la instalación.

Según los cálculos realizados si se obtienen resultados adecuados en las pruebas que se realicen en trenes de cercanías estos refrigerantes serán adecuados para los servicios media y larga distancia. Esto es debido a que su potencia instalada es superior y la carga térmica a la que se ven sometidos es inferior al ser parámetros fundamentales el número de personas que se transportan que lleva también a mayor renovación de aire.

6. APORTACIONES

Con el trabajo se realiza un análisis de la situación del parque de Renfe ante el problema presentado en los equipos de aire acondicionado con refrigerantes. Resumimos el seguimiento de las iniciativas que plantea el sector para poder analizar la solución óptima en la explotación. Por otra parte tenemos en prueba alternativa en dos vehículos de los cuales se podrá ver el comportamiento a la hora de asegurar la fiabilidad en explotación del equipo.

Finalmente planteamos un análisis de cargas térmicas para la toma de decisión respecto a la bajada de rendimiento del equipo buscando que el cambio no afecte al confort, queremos encontrar el equilibrio económico sin que el viajero note disminución de prestaciones.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Torrella Alcaraz, Enrique , La producción de frío , Universidad Politecnica de Valencia. Departamento de Termodinámica aplicada Ref 2000.0201.
- [2] Haller, Gabriel, Thermal Comfort in Rail Vehicles , artículo Climatic Wind Tunnel Viena, septiembre 2006.
- [3] Alvarez García, Alberto, M^a del Pilar Martín Cañizares, Energía y Emisiones en el transporte por ferrocarril, Fundación de los Ferrocarriles Españoles, 2008.
- [4] Environmental investigation agency, Manual del Reglamento sobre gases fluorados en la UE: Mantenerse a la vanguardia mientras Europa reduce los HFC, noviembre de 2015.
- [5] www.bitzer.es
- [6] www.danfoss.es
- [7] www.emerson.com
- [8] www.aemet.es
- [9] www.refrigerantes.mobi
- [10] Planes de mantenimiento vehículos Renfe.
- [11] Normas técnicas de mantenimiento equipos de aire acondicionado Renfe.

