



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UNA INSTALACIÓN DE REFRIGERACIÓN POR EYECCIÓN DE VAPOR ANTE EL CAMBIO DE FLUIDO REFRIGERANTE

Alumno: Jesús Díaz Segura

Tutor: Prof. D^a. Eloísa Torres Jiménez

Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera

Doña Eloísa Torres Jiménez , tutora del Trabajo Fin de Grado titulado: Estudio Experimental de una Instalación de Refrigeración Eyección de Vapor ante el cambio de fluido refrigerante, que presenta Jesús Díaz Segura, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, septiembre de 2016

El alumno:

Jesús Díaz Segura

La tutora:

Eloísa Torres Jiménez

Índice

1.	Introducción	7
1.1	Resumen	7
1.2	Abstract	7
1.3	Descripción de los contenidos	7
2.	Ciclos de refrigeración	8
2.1	Refrigeradores y bombas de calor.....	8
2.2	El ciclo de Carnot invertido	8
2.3.	El ciclo de compresión de vapor.....	10
2.3.1.	Ciclo ideal de compresión de vapor.....	10
2.3.2.	El ciclo real de compresión de vapor	12
2.3.3	Ciclos avanzados de refrigeración.....	13
2.4	Sistemas de refrigeración sin compresión.....	16
2.4.1	Refrigeración por eyección de vapor	16
2.4.2	Refrigeración por absorción.....	16
3.	Refrigerantes	18
3.1	Tipos y principales características.....	18
3.1.1	Refrigerantes sintéticos	19
3.1.2	Refrigerantes naturales.....	20
3.2	Clasificación de los refrigerantes.....	21
3.2.1	Clasificación en función de su inflamabilidad	21
3.2.2	Clasificación en función de la toxicidad	22
3.2.3	Clasificación en función de la peligrosidad para el medio ambiente	22
3.3	Normativa vigente.....	24
3.3.1	Antecedentes: El protocolo de Montreal	25
3.3.2.	Reglamento UE nº517/2014	27
3.5	Sustitutos	33
4.	Bomba de calor/refrigeración a chorro de vapor R851.	35
4.1	Justificación del modelo escogido.	35
4.2	Descripción de la máquina.	35
4.3	Diagrama esquemático.....	35
4.4	Especificaciones.....	38
4.5	Dimensiones.	39

4.6 Servicios requeridos.....	39
4.7 Dispositivos de seguridad.....	39
4.8 Instalación.....	40
4.9 Conexiones eléctricas.....	40
4.10 Abastecimiento de agua.....	40
4.11 Cargar el refrigerante.....	41
4.12 Cebado de la bomba de circulación de agua.....	42
4.13 Problemas de cavitación en la bomba.....	42
4.12.1 Cavitación empezando de frío.....	43
4.12.2 Cavitación debido a la reducción de la presión del condensador.....	44
4.14 Operación.....	44
4.15 Cierre.....	45
4.16 Cuidados.....	46
4.17 Mantenimiento.....	47
4.17.1 Detección de fugas.....	47
4.18 Bomba de alimentación.....	48
4.18.1 Lubricación.....	48
4.18.2 Empaquetadura.....	48
4.18.3 Válvulas de retención.....	48
4.18.4 Filtros.....	48
4.19 Drenado de líquido refrigerante.....	49
4.20 Drenado de agua.....	49
4.21 Reemplazo del elemento calentador en el evaporador.....	50
4.22 Disyuntor de corriente residual.....	50
5. Definición de los ensayos realizados.....	51
5.1 Propiedades de los refrigerantes seleccionados.....	51
5.2 Realización de los ensayos.....	52
5.3 Resultados obtenidos.....	56
5.3.1 Diagrama P-h.....	56
5.3.2 Presiones, Temperaturas, Entalpías y Entropías de todos los puntos.....	58
5.3.3 Flujos, Potencias y Eficiencias.....	60
6. Conclusiones.....	60
7. Referencias.....	61

1. Introducción

1.1 Resumen

Cuando una instalación de refrigeración sufre un cambio de refrigerante debido a la entrada en vigor de una nueva normativa que prohíba el uso del refrigerante antiguo, se debe evaluar el funcionamiento de la máquina con el nuevo refrigerante para comprobar cambios en la eficiencia, debiendo tratar de mantener la misma eficiencia sin necesidad de cambiar la instalación o sus componentes, con el consiguiente ahorro y simplicidad que supone solamente el proceso de cambio del fluido refrigerante.

1.2 Abstract

When a cooling system undergoes a change of coolant due to the entry into force of new regulations prohibiting the use of the old refrigerant, the functioning of the machine with the new refrigerant must be assessed in order to try to maintain the same efficiency without changing the system or its components, thus saving and simplifying the process of changing the coolant.

1.3 Descripción de los contenidos

Se empezará hablando de los ciclos de refrigeración, con el ciclo de Carnot invertido y el ciclo de compresión de vapor para luego después describir algunos ciclos avanzados de refrigeración, como el ciclo de refrigeración en cascada, ciclo de etapas múltiples, ciclo de eyección de vapor y ciclo de absorción.

Luego se hablará de los refrigerantes, enumerando sus tipos, clasificación y la normativa vigente, para dar paso a describir algunos sustitutos empleados en la actualidad.

Después, se hará una descripción detallada de la máquina de eyección de vapor R851, describiendo su funcionamiento, componentes y problemas que puedan aparecer durante su uso. Posteriormente, se describirán la realización del ensayo, así como el uso del software con el que se simulará el mismo caso con el refrigerante original que usaba la máquina.

Finalmente, se mostrarán los resultados de ambos ensayos y se darán las conclusiones y la bibliografía usada.

2. Ciclos de refrigeración

2.1 Refrigeradores y bombas de calor

Se sabe que la transferencia de calor ocurre en la dirección de la temperatura decreciente sin necesidad de la participación de algún dispositivo. Sin embargo, según el postulado de Clausius, el proceso inverso no sucede de manera espontánea, requiriéndose de un dispositivo que aporte energía para transferir el calor desde la región de temperatura baja a la de temperatura alta, dicho dispositivo recibe el nombre de refrigerador o máquina frigorífica.

Un refrigerador es un dispositivo cíclico que absorbe calor de una fuente fría y cede calor al foco caliente, que suele ser el ambiente. Para poder accionar la máquina se debe suministrar trabajo desde el exterior.

Otro dispositivo que transfiere calor desde una región fría hasta una región caliente es la bomba de calor, sin embargo el objetivo de la bomba de calor es el de mantener un espacio caliente a alta temperatura. Tanto el refrigerador como la bomba de calor son en esencia lo mismo, salvo por el objetivo que persigue cada uno.

2.2 El ciclo de Carnot invertido

El ciclo de Carnot es un ciclo totalmente reversible que se compone de dos procesos isotermos y dos procesos adiabáticos. Dicho ciclo tiene el máximo rendimiento para unos límites de temperatura y es un modelo de comparación para los ciclos reales.

Al ser un ciclo totalmente reversible, los cuatro procesos que lo componen se pueden invertir, invirtiendo también la interacción entre el calor y el trabajo. Esto es el ciclo de Carnot invertido y un refrigerador o bomba de calor que describe dicho ciclo se llama refrigerador de Carnot o bomba de calor de Carnot.

El refrigerante absorbe calor isotérmicamente de una fuente a baja temperatura, se comprime isoentrópicamente, donde se eleva la temperatura, rechaza calor isotérmicamente en un sumidero de alta temperatura y se expande isoentrópicamente, cerrando el ciclo. El refrigerante cambia de estado desde vapor saturado a líquido saturado durante el rechazo de calor. En la siguiente ilustración se muestra el ciclo invertido de Carnot en un diagrama T-s

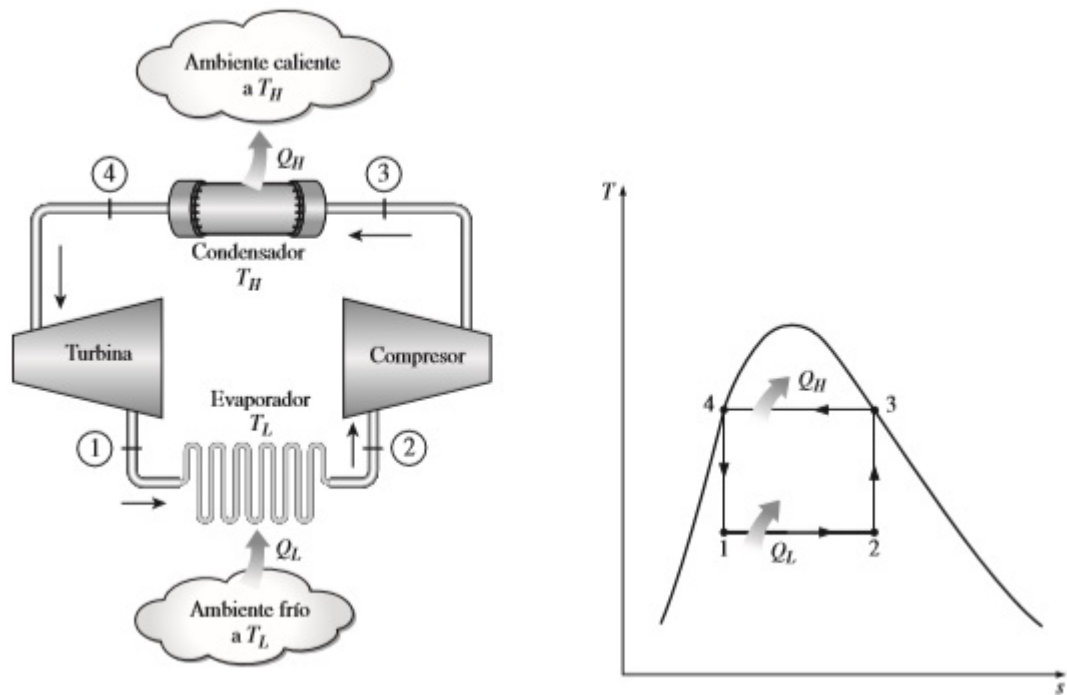


Figura 1: Esquema y diagrama T-s de un refrigerador de Carnot

La eficiencia para una máquina frigorífica de Carnot como una bomba de calor de Carnot es:

1. Como máquina frigorífica.

$$\varepsilon = \frac{T_L}{T_H - T_L}$$

2. Como bomba de calor.

$$\varepsilon = \frac{T_H}{T_H - T_L}$$

Donde:

T_L es la temperatura del foco frío

T_H es la temperatura del foco caliente

El ciclo invertido de Carnot es el ciclo de refrigeración más eficiente que opera entre dos niveles específicos de temperatura. Por tanto, se considera como un ciclo ideal esperado para los refrigeradores y bombas de calor. Sin embargo, el ciclo invertido de Carnot es un modelo inadecuado para los ciclos de refrigeración debido a que los procesos de compresión y expansión implica un refrigerante con un alto contenido de humedad.

Estos problemas podrían eliminarse si se ejecuta el ciclo fuera de la región de saturación. Pero en ese caso se presenta dificultades para mantener las condiciones isotermas durante los procesos de absorción y rechazo de calor. Por lo tanto se concluye que el ciclo invertido de Carnot no se puede aproximar en los dispositivos reales. Aún así, sirve como un punto de inicio con el cual se comparan los ciclos reales de refrigeración.

2.3. El ciclo de compresión de vapor

Los aspectos imprácticos asociados al ciclo de Carnot invertido pueden ser solucionados al evaporar el refrigerante por completo antes de comprimirlo y sustituyendo la turbina con un dispositivo de estrangulamiento, como una válvula o un tubo capilar. El ciclo resultante es el ciclo de compresión de vapor o ciclo de Rankine invertido. Este ciclo es el más utilizado en sistemas de aire acondicionado, bombas de calor y refrigeradores.

2.3.1. Ciclo ideal de compresión de vapor.

El ciclo ideal de compresión de vapor se compone de cuatro procesos:

- 1) Compresión isoentrópica en un compresor.
- 2) Cesión de calor a presión constante en un condensador.
- 3) Expansión isoentálpica en una válvula de estrangulamiento.
- 4) Absorción de calor a presión constante en un condensador.

En la siguiente ilustración se muestra el ciclo ideal de compresión de vapor

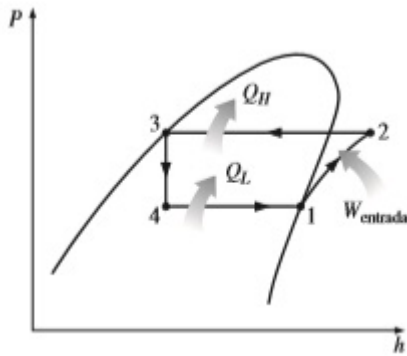


Figura 2 Diagrama P-h del ciclo de compresión de vapor

El refrigerante entra al compresor como vapor saturado y se comprime isoentrópicamente hasta la presión del condensador, donde la temperatura del refrigerante aumenta hasta un valor muy superior a la temperatura del ambiente. Después, el vapor entra el condensador como vapor recalentado y sale como líquido saturado, la temperatura del refrigerante se mantiene por encima de la temperatura del ambiente.

El refrigerante en estado de líquido saturado entra a la válvula de expansión, donde se estrangula isoentálpicamente hasta la presión del evaporador. En este proceso, la temperatura del refrigerante desciende por debajo de la temperatura del espacio que se quiere refrigerar. El refrigerante entra al evaporador como vapor húmedo de bajo título, donde se evapora por completo absorbiendo calor del medio refrigerado y entrando de nuevo al compresor como vapor saturado, completando el ciclo.

La eficiencia para un ciclo idea de compresión de vapor es:

1. Máquina frigorífica

$$\varepsilon = \frac{Q_L}{W_{entrada}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

2. Bomba de calor

$$\varepsilon = \frac{Q_H}{W_{entrada}} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1}$$

Donde

Q_L es el calor que absorbe el evaporador

Q_H es el calor que cede el condensador

W_{entrada} es el trabajo generado por el compresor

2.3.2. El ciclo real de compresión de vapor

El ciclo real de compresión de vapor difiere en varios aspectos de uno ideal debido a las irreversibilidades que ocurren en varios componentes. Dichas irreversibilidades son la fricción del fluido, que causa una caída de presión y la transferencia de calor hacia o desde los alrededores.

En el ciclo ideal el vapor entra al compresor como vapor saturado. Sin embargo no es posible controlar el estado del refrigerante con tanta precisión. En lugar de eso, se diseña el sistema de modo que el refrigerante se sobrecaliente un poco a la entrada del compresor, asegurándose de que se evapora por completo cuando entra al compresor. También, como la línea que conecta el evaporador con el compresor es muy larga, se puede originar una caída de presión debido a la fricción y una transferencia de calor de los alrededores. Dichas pérdidas pueden llegar a ser significativas.

En la siguiente ilustración se muestra dicho ciclo real de compresión de vapor:

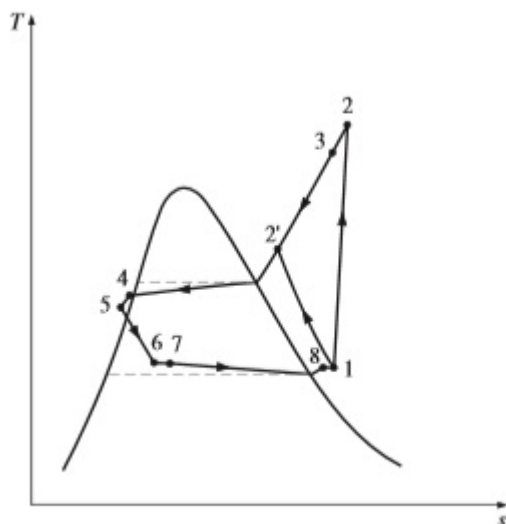


Figura 3: Diagrama T-s del ciclo real de compresión de vapor

2.3.3 Ciclos avanzados de refrigeración

Los sistemas de refrigeración por compresión de vapor ordinarios son simples, económicos, confiables y libres de mantenimiento prácticamente. Sin embargo, en grandes aplicaciones industriales importa más la eficiencia que la simplicidad, por lo que, en algunas aplicaciones, el ciclo simple de refrigeración es inadecuado y necesita de modificación. Algunas de estas modificaciones serán analizadas.

2.3.3.1 Refrigeración en cascada

Muchas aplicaciones requieren de temperaturas bajas y el intervalo de temperaturas que involucran es demasiado grande para un ciclo simple de refrigeración. También, un gran intervalo de temperatura significa un gran nivel de presión y un pobre desempeño en un compresor.

Una manera de solucionar dicha situación consiste en efectuar un proceso de refrigeración por etapas, es decir, que haya dos o más ciclos operando en serie. Dichos procesos se denominan ciclos de refrigeración en cascada.

Los ciclos se conectan por medio de un intercambiador de calor, que sirve como evaporador para el ciclo superior y como condensador para el ciclo inferior.

En el sistema de refrigeración en cascada los refrigerantes se suponen igual, pero esto no es necesariamente así ya que no se produce mezcla en el intercambiador de calor. Por lo tanto, se pueden usar los refrigerantes con características más deseables en cada ciclo.

Resulta evidente que el trabajo del compresor disminuye y que la cantidad de calor absorbido en el condensador aumenta como resultado de las etapas en cascada, por lo que mejora la eficiencia de un sistema de refrigeración.

En la siguiente ilustración se muestra el sistema de refrigeración en cascada.

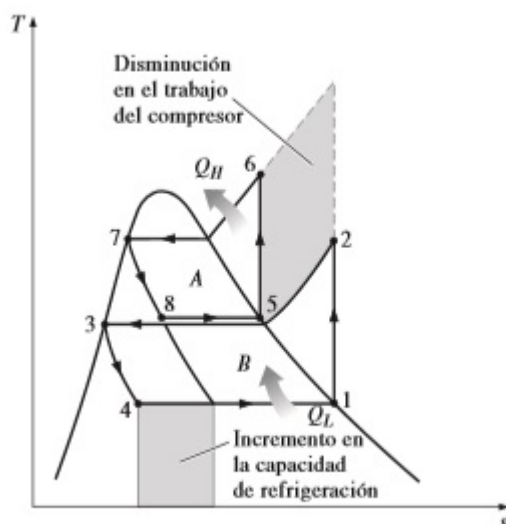


Figura 4: Diagrama T-s del sistema de refrigeración en cascada

Suponiendo que el intercambiador está bien aislado y que se desprecia la energía cinética y potencial, podemos establecer un balance de energía en el intercambiador de calor, se puede hablar de una relación de flujos de modo que:

$$\frac{\dot{m}_A}{\dot{m}_B} = \frac{h_2 - h_3}{h_5 - h_8}$$

Donde $\dot{m}_A$ es el flujo en el ciclo superior y $\dot{m}_B$ es el flujo en el ciclo inferior

La eficiencia se puede escribir de la siguiente forma

$$\varepsilon = \frac{Q_L}{W_{\text{neto, entrada}}} = \frac{\dot{m}_B(h_1 - h_4)}{\dot{m}_A(h_6 - h_5) + \dot{m}_B(h_2 - h_1)}$$

2.3.3.2 Sistemas de refrigeración por compresión de múltiples etapas

Se puede sustituir el intercambiador por una cámara de mezclado cuando se trabaja con el mismo refrigerante, ya que produce una mejor transferencia de calor. A dicho sistema se le denomina sistema de refrigeración por compresión de múltiples etapas.

En este sistema, el refrigerante se expande en la primera válvula de expansión hasta la presión de la cámara de mezcla. Parte del refrigerante se evapora en este proceso y se mezcla con el vapor recalentado del compresor de baja presión y la mezcla entra al compresor de alta presión. El resto del refrigerante se expande en la segunda válvula de expansión, donde entra al evaporador, absorbiendo calor del espacio refrigerado.

En la siguiente ilustración se observa el ciclo de compresión con dos etapas.

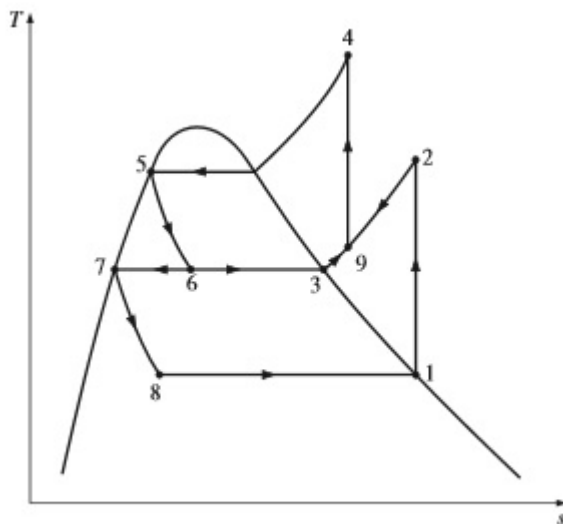


Figura 5 Diagrama T-s del sistema de doble compresión con intercambio másico

2.4 Sistemas de refrigeración sin compresión.

Se puede prescindir del compresor cuando las necesidades de refrigeración no son muy elevadas y por tanto la diferencia de presiones entre el evaporador y condensador tampoco lo son. Estos sistemas tienen una eficiencia baja y su utilización es meramente para el enfriamiento de agua (superior a 0°C) o para enfriar aire. Alguno de estos ciclos son los siguientes.

2.4.1 Refrigeración por eyección de vapor

Este ciclo, también llamado refrigeración por vacío describe el siguiente proceso: Se genera vapor en una caldera, que pasa por el eyector compuesto de una tobera en primera parte, que hace disminuir la presión hasta la presión del evaporador y por consiguiente, aumentar la velocidad. Dicho aumento crea un vacío que succiona el vapor del evaporador produciéndose una mezcla. La mezcla pasa por la segunda parte del eyector, que es un difusor donde se aumenta la presión hasta la presión del condensador, no haciendo falta del compresor. En el condensador, que es un intercambiador de calor, se condensa todo el vapor y a la salida de éste se bifurca, una parte vuelve a ser bombeado en la caldera y la otra se expande isoentálpicamente pasando al evaporador.

2.4.2 Refrigeración por absorción

El fenómeno de absorción es un proceso en el cual un líquido tiene la propiedad de absorber una cantidad de vapor, que va acompañado por un desprendimiento de calor. Generalmente el fluido empleado es una mezcla formada por agua y amoníaco, donde el agua es el disolvente y el amoníaco el refrigerante.

El proceso es el siguiente: En el absorbedor se disuelve el vapor de amoníaco en el agua fría. Al disolverse el amoníaco se desprende calor, por lo que es necesario enfriar el absorbedor para mantener su temperatura lo más baja posible y así aumentar la cantidad de amoníaco a disolver en agua. La disolución fría es bombeada al generador de vapor, donde se calienta hasta unos 100 o 150°C. Cuando se calienta, la solubilidad del amoníaco disminuye, desprendiéndose del agua en forma de vapor. El agua regresa en estado líquido al absorbedor mientras que el amoníaco puro pasa al condensador, donde cede el calor al medio caliente, de ahí pasa a una válvula de expansión, donde se estrangula hasta la presión del

evaporador, donde al pasar por el evaporador, absorbe calor del medio que se quiere refrigerar y finalmente vuelve al absorbedor, donde se cierra el ciclo.

El sistema de refrigeración por absorción tiene atractivo cuando se dispone de una fuente de energía térmica barata, como la geotérmica, la solar, el calor residual de centrales de cogeneración e incluso el gas natural si está a un precio bajo. Sin embargo, son equipos muy costosos, ocupan mucho espacio y tienen una eficiencia relativamente baja.

Dicho sistema fue patentado por Ferdinand Carré en 1859.

La siguiente ilustración muestra un esquema de un sistema de refrigeración por absorción.

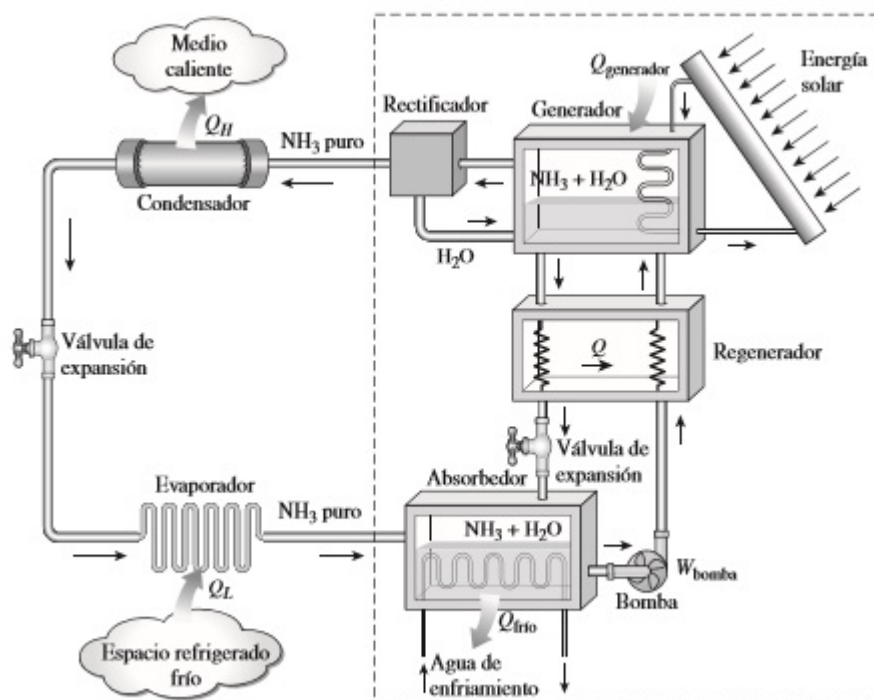


Figura 6: Esquema de un sistema de refrigeración por absorción

3. Refrigerantes

Un refrigerante es un fluido usado en un sistema de refrigeración donde absorbe calor a baja temperatura y presión y lo cede a alta temperatura y presión. En este proceso tiene lugar cambios de fase del fluido.

3.1 Tipos y principales características

Un buen refrigerante debe cumplir múltiples cualidades, pero no todas pueden ser satisfechas a la vez. Se hace evidente que en la medida que la naturaleza del refrigerante sea tal que la relación presión-temperatura de condensación se aproximen a las del ambiente, necesitaremos menos energía para comprimirlo y enfriarlo. A su vez, si coincidiera que su diferencia de calor latente respecto al ambiente fuese lo suficientemente alto para realizar la transferencia de calor, requeriríamos menos cantidad de refrigerante para comprimirlo y por ende, menos trabajo. Estas cualidades son imprescindibles en el consumo de energía. También hay que sumar la naturaleza química del refrigerante, las que proporcionarán poder realizar el trabajo de refrigeración con mayor o menos eficiencia.

Podemos resumir las cualidades que deben cumplir un buen refrigerante:

1. No debe degradar la atmósfera al escaparse. Debe ser inerte sobre la reducción de la capa de ozono y no incrementar el potencial efecto invernadero.
2. Ser químicamente inerte, no inflamable, no explosivo, tanto en su estado puro como en las mezclas.
3. Inerte a los materiales con los que se pone en contacto, tuberías, sellos, juntas, etc.
4. No reaccionar desfavorablemente con los aceites lubricantes y presentar una satisfactoria solubilidad en él.
5. No intoxicar el ambiente por escapes y ser nocivo a la salud de las personas.
6. La relación entre la presión del evaporador y la del condensador debe cumplir con la eficiencia del consumo energético.
7. Poseer un elevado coeficiente de transferencia de calor por conducción.

8. Cumplirse que la relación presión - temperatura en el evaporador sea superior a la atmosférica, para evitar la entrada de humedad o aire al sistema.
9. Que su punto de congelación sea menor que la menor temperatura de trabajo de sistema de refrigeración
10. Fácil detección en fugas.
11. Bajo precio y fácil disponibilidad.

Se conoce dos grandes grupos de fluidos refrigerantes:

- Sintéticos: Que provienen de hidrocarburos halogenados.
- Naturales

3.1.1 Refrigerantes sintéticos

Se conocen tres grupos principales

1. CFC: También llamado clorofluorcarbono. Son refrigerantes que consisten de cloro, flúor y carbono. Son muy estables químicamente, de baja toxicidad y presentan buena compatibilidad con la mayoría de lubricantes y de materiales tradicionales. Tienen una amplia variedad de características de presión y de temperatura y sus propiedades termodinámicas y de transporte son generalmente buenas, por lo tanto tienen un potencial muy bueno de eficiencia. El principal inconveniente es que son causantes del deterioro de la capa de ozono y su estabilidad en la atmósfera por largos periodos de tiempo. Internacionalmente se ha prohibido su fabricación y empleo. En esta familia los refrigerantes principales son el R11, R12 y R115.
2. HCFC: Consisten de hidrógeno, cloro, flúor y carbono. Al contener hidrógeno, son menos estables químicamente que los CFC, pero se sigue presentando una buena compatibilidad con la mayoría de los lubricantes tradicionales. También afecta a la capa de ozono, pero en menor medida. Su desaparición está prevista para el 2015. Dentro de esta familia destaca el R22, R123 y R124
3. HFC: Consisten de hidrógeno, flúor y carbono. Están siendo usados en la mayoría de aplicaciones correspondientes a los CFC y HCFC como el acondicionamiento de aire y la refrigeración industrial. Son generalmente

estables químicamente y tienden a ser compatibles con la mayoría de materiales. Sin embargo no se pueden mezclar con lubricantes tradicionales, empleándose únicamente lubricantes sintéticos. Tienen la ventaja de no dañar la capa de ozono, sin embargo tienen un alto potencial de calentamiento atmosférico, por lo que numerosos países están desarrollando leyes que controlen el uso y emisión de gases HFC, muchos aún están disponibles y continuarán estando por un largo tiempo. Los HFC más destacables son el R134a, R32, R125 y R143a.

3.1.2 Refrigerantes naturales

Los refrigerantes naturales existen en los ciclos de la naturaleza incluso sin intervención del ser humano. No presentan agotamiento de la capa de ozono ni son responsables del calentamiento atmosférico. Debido a ese mínimo impacto ambiental y por ser más acordes desde el punto de sustentabilidad tecnológica, estos refrigerantes pueden jugar un papel importante en muchas aplicaciones.

Dentro de este grupo destacan los siguientes refrigerantes:

1. Amoníaco (NH_3): También llamado R717, contiene nitrógeno e hidrógeno. Es ampliamente usado en muchas industrias, siendo empleado desde 1800 y actualmente se usa en refrigeración industrial, almacenaje en frío y recientemente en refrigeración comercial y chillers. Es químicamente estable, pero reacciona cuando se pone en contacto con dióxido de carbono, agua o cobre. Sin embargo es compatible con el acero y con un aceite bien seleccionado. Sus características de presión y temperatura son similares a las del R22, sus propiedades de transporte son muy buenas, pudiendo aumentar la eficiencia de los sistemas. El principal inconveniente de este refrigerante es su alto grado de toxicidad.
2. Dióxido de carbono (CO_2): Conocido como R744 contiene carbono y oxígeno. Ampliamente usado en muchas aplicaciones industriales a mediados del siglo XIX, pero su uso cayó en decadencia con la aparición de los CFC y HCFC. Sin embargo a finales del siglo XX emergió nuevamente y su uso se ha ido incrementando en las industrias. Es

químicamente estable y compatible con muchos materiales. Sus características de presión y temperatura son diferentes a la mayoría de refrigerantes y su sistema de uso debe estar diseñado para soportar altas presiones. Sus propiedades termodinámicas son excelentes y en climas fríos son sistemas muy eficientes. Tienen baja toxicidad, son muy baratos y no son inflamables. El inconveniente que puede presentar es que su temperatura crítica es baja.

3.2 Clasificación de los refrigerantes.

Los refrigerantes e pueden clasificar en función de varios criterios: inflamabilidad, toxicidad y peligrosidad para el medio ambiente.

Según los efectos sobre la salud y seguridad, atendiendo a posibles efectos causador por su inhalación y su poder combustible, los refrigerantes se clasifican en estos tres grupos:

1. L1 o alta seguridad: Son refrigerantes no inflamables y de acción tóxica nula o ligera.
2. L2 o media seguridad: Son refrigerantes de acción tóxica, corrosiva, inflamable o explosivos mezclados con aire en un porcentaje de volumen igual o superior a 3,5%.
3. L3 o baja seguridad: Son refrigerantes inflamables o explosivos mezclados con aire en un porcentaje de volumen inferior al 3,5%.

3.2.1 Clasificación en función de su inflamabilidad

Los refrigerantes deberán incluirse dentro de uno de los tres grupos siguientes según el límite inferior de inflamabilidad a presión atmosférica y temperatura ambiente:

1. Grupo 1: No inflamables a cualquier concentración en el aire.
2. Grupo 2: Su límite de inflamabilidad mezclados con el aire es igual o superior al 3,5%.
3. Grupo 3: Su límite de inflamabilidad mezclados con el aire es inferior al 3,5%.

3.2.2 Clasificación en función de la toxicidad

La toxicidad es propiedad de una sustancia que la hace nociva o letal para personas y animales debido a una exposición intensa o prolongada por contacto, inhalación o ingestión. Los refrigerantes deberán incluirse dentro de uno de los siguientes grupos en función de su toxicidad.

1. Grupo A: Refrigerantes cuya concentración media en el tiempo no tiene efectos adversos para la mayoría de trabajadores que puedan estar expuestos y cuyo valor es igual o superior a una concentración media de 400 ppm.
2. Grupo B: Refrigerantes cuya concentración media en el tiempo no tiene efecto adversos para la mayoría de los trabajadores que puedan estar expuestos y cuyo valor es inferior a una concentración media de 400 ppm.

3.2.3 Clasificación en función de la peligrosidad para el medio ambiente

Como se ha descrito anteriormente, hay que tener en cuenta que ciertos refrigerantes pueden ser perjudiciales para el medio ambiente, presentando la capacidad de calentamiento atmosférico y de agotamiento de la capa de ozono. Para medir dichas cantidades se recurren a unas medidas llamadas Potencial de Calentamiento Atmosférico (PCA) y Potencial de Agotamiento de la capa de Ozono (PAO)

El Potencial de Calentamiento Atmosférico, también llamado GWP (del inglés Global Warming Potential) es el potencial de calentamiento climático de un gas de efecto invernadero respecto al del dióxido de carbono, 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. Así pues se habla de un potencial de calentamiento en comparación con el dióxido de carbono, que toma el valor 1.

El Potencial de Agotamiento de la capa de Ozono, también llamado ODP (del inglés Ozone Depletion Potential) cuantifica la capacidad de un gas para destruir o degradar la capa de ozono. Se trata de un valor relativo la referencia que se utiliza es el R-11, que es el CFC con mayor ODP, quien se le impone un valor de ODP de 1. Si un refrigerante tiene un ODP menor de 1 quiere decir que agota menos la capa

de ozono, mientras que un refrigerante con un ODP mayor de 1 ataca más agresivamente la capa de ozono.

En la siguiente imagen se muestra los coeficientes de algunos refrigerantes usados en la industria.

PCG Y PAO DE DIVERSOS REFRIGERANTES USADOS EN LA INDUSTRIA							
	Composición	Tiempo de vida (años)	PCG según un determinado periodo de tiempo			PAO	Fuente
			20 años	100 años	500 años		
R-32	HFC	5	2330	675	205	0	IPCC, 2007
R-22	HCFC	12	5160	1810	549	0.055	IPCC, 2007
R-12	CFC-12	100	11000	10900	5200	1	USEPA, 2010
R-134a	HFC	14	3830	1430	435	0	IPCC, 2007
R-1234yf	HFC no saturados			4		0	USEPA, 2010
R-502	CFC-115: 51.2 % HCFC-22: 48.8 %		5237	4657	5383	0.334	
R-507a	HFC-125: 50% HFC-134a: 50 %		5090	2465	767	0	
R-404a	Mezcla de HFC HFC-125: 44 % HFC-134a: 4 % HFC-143a: 52 %		6010	3922	1328	0	
R-407a	HFC-32: 20 % HFC-125: 40 % HFC 134a: 40 %		4358	2107	655	0	
R-407c	Mezcla de HFC HFC-32: 23 % HFC-125: 25 % HFC-134a: 52 %		4115	1774	548	0	
R-600a	Isobutano	Deleznable	Deleznable	3	0	0	IPCC / TEAP, 2005
R-290	Propano	Deleznable	Deleznable	3.3	0	0	IPCC / TEAP, 2005
R-1270	Propileno	Deleznable	Deleznable	1.8	0	0	IPCC / TEAP, 2005
R-744	CO ₂	1	1	1	1	0	IPCC, 2007
R-717	Amoníaco	Unos cuantos días	0	0	0	0	IPCC / TEAP, 2005

Fuente: GIZ Proklima

Figura 7: Tabla con potenciales de agotamiento de la capa de ozono y potencial de calentamiento global de distintos refrigerantes

Para evaluar la contribución total del sistema de refrigeración al calentamiento atmosférico se ha concebido el Impacto Total Equivalente sobre el Calentamiento Atmosférico o TEWI (del inglés Total Equivalent Warming Impact). Cuantifica el

calentamiento atmosférico directo del refrigerante si se libera, y la contribución indirecta de la energía requerida para que le equipo trabaje durante su vida útil. Es válido únicamente para comparar sistemas alternativos u opciones de refrigerantes en una aplicación concreta. El TEWI incluye:

1. Impacto directo sobre el calentamiento atmosférico bajo ciertas condiciones de pérdida de refrigerante.
2. Impacto directo sobre el calentamiento atmosférico debido a los gases emitidos por el aislamiento u otros componentes, si procede.
3. Impacto indirecto sobre el calentamiento atmosférico por el CO₂ emitido durante la generación de la energía consumida por el sistema.
4. Identificación de la instalación más eficiente para reducir el impacto real del calentamiento atmosférico producido por un sistema de refrigeración.

El factor TEWI puede calcularse mediante la siguiente fórmula:

$$TEWI = [PCA * L * n] + [PCA * m * (1 - \alpha_{recuperación})] + [n * E_{anual} * \beta]$$

Donde:

$PCA * L * n$ es el impacto debido a las pérdidas por fugas que se considera PCA directo.

$PCA * m * (1 - \alpha_{recuperación})$ es el impacto por pérdidas producidas en la recuperación, considerado PCA directo.

$n * E_{anual} * \beta$ es el impacto debido a la energía consumida, siendo un PCA indirecto

3.3 Normativa vigente

El sector de los gases refrigerantes se encuentra actualmente en plena evolución debido a la aplicación de la normativa europea F-Gas, cuyo objetivo principal es la reducción del uso de gases de efecto invernadero (GEI) en un 70% de cara al año 2030. Esta normativa, en vigor desde el 1 de Enero de 2014, ha generado un clima de incertidumbre entre los profesionales y fabricantes, quienes se encuentran buscando alternativas y gases sustitutos que sean compatibles con los equipos de refrigeración ya instalados y que sean igual de eficientes en su aplicación.

3.3.1 Antecedentes: El protocolo de Montreal

Firmado por diferentes países en el año 1987 como una medida global para hacer frente al problema del deterioro de la Capa de Ozono que afecta a las personas del mundo. El cumplimiento de las normas establecidas en dicho Protocolo, sus enmiendas y ajustes, han controlado el uso de las sustancias químicas sumando al desarrollo industrial sustancias sustitutas que no agotan la capa de ozono. La acumulación de gases agotadores de ozono se ha frenado e incluso disminuido lo que ha reducido el riesgo de futuros daños a la Capa de Ozono.

Con 197 países firmantes, el Protocolo es uno de los tratados más ampliamente ratificados en la historia de la Naciones Unidas y es responsable, conjuntamente con el Tratado de Viena, hasta la fecha de más del 97% de reducción en el consumo de sustancias controladas que agotan la capa de ozono.

El objetivo principal del Protocolo de Montreal es la protección de la Capa de Ozono mediante la toma de medidas para controlar la producción total mundial y el consumo de sustancias que la agotan, con el objetivo final de eliminarlas, sobre la base del progreso de los conocimientos científicos e información tecnológica y proteger así la frágil Capa de Ozono del planeta.

El Protocolo de Montreal se estructura en torno a varios grupos de sustancias destructoras del ozono. Los grupos de sustancias químicas se clasifican de acuerdo a la familia química y se enumeran en los anexos al texto del Protocolo de Montreal.

El Protocolo exige el control de casi 100 sustancias químicas en varias categorías. Para cada grupo o anexo de sustancias químicas, el Tratado establece un calendario para la eliminación gradual de la producción y el consumo de esas sustancias, con el objetivo de eventualmente eliminarlas por completo.

El calendario establecido por el Protocolo de Montreal se aplica al consumo de sustancias destructoras del ozono. El consumo se define como las cantidades producidas, más importadas, menos las cantidades exportadas en un año determinado. También existe una deducción por la destrucción verificada.

Incluye una provisión de ajuste única que permite a las Partes al Protocolo responder rápidamente a toda nueva información científica y llegar a un acuerdo para acelerar las reducciones requeridas de productos químicos según el Protocolo. Estos ajustes son automáticamente aplicables a todos los países que ratificaron el Protocolo. Desde su adopción inicial, el Protocolo ha sido ajustado en varias ocasiones.

Esos ajustes entraron en vigor, para todas las Partes, el 7 de marzo de 1991, el 23 de septiembre de 1993, el 5 de agosto de 1996, el 4 de junio de 1998, el 28 de julio del 2000 y el 14 de mayo del 2008, respectivamente.

Además de ajustar el Protocolo, las Partes en el Protocolo de Montreal han introducido enmiendas al Protocolo para facilitar entre otras cosas el control de nuevos químicos y la creación de un mecanismo financiero que facilite el cumplimiento de países en desarrollo. Específicamente, la Segunda, Cuarta, Novena y Undécima reuniones de las Partes en el Protocolo de Montreal aprobaron, de conformidad con el procedimiento establecido en el párrafo 4 del artículo 9 del Convenio de Viena, cuatro enmiendas del Protocolo, la "Enmienda de Londres" (1990), la "Enmienda de Copenhague" (1992), la "Enmienda de Montreal" (1997) y la "Enmienda de Beijing" (1999).

En contraste con los ajustes al Protocolo, las enmiendas deben ser ratificadas por los países antes de que los respectivos requisitos sean aplicables a los países. Las Enmiendas de Londres, de Copenhague, de Montreal y de Beijing entraron en vigor, únicamente para las Partes que las ratificaron, el 10 de agosto de 1992, el 14 de junio de 1994, el 10 de noviembre de 1999 y el 25 de febrero de 2002, respectivamente.

Aparte de los ajustes y enmiendas al Protocolo de Montreal, las Partes en el Protocolo se reúnen anualmente y adoptan una variedad de decisiones con la intención de facilitar la aplicación efectiva de este importante instrumento legal.

A través de las reuniones de las Partes en el Protocolo de Montreal, las Partes han aprobado más de 740 decisiones. Las decisiones adoptadas por las Partes son

incluidas en los informes de la Reuniones de las Partes. Las decisiones de las Partes también son incluidas en el Manual del Protocolo de Montreal.

La aplicación del Protocolo de Montreal ha progresado en los países desarrollados y países en desarrollo. Todos los calendarios de eliminación se han respetado en la mayoría de los casos, algunos incluso antes de lo previsto.

El 16 de septiembre del 2009, el Convenio de Viena y el Protocolo de Montreal fueron los primeros tratados en la historia de las Naciones Unidas a obtener ratificación universal.

3.3.2. Reglamento UE nº517/2014

Cuya entrada en vigor fue el 9 de Junio de 2014 y su fecha de aplicación el 1 de enero de 2015 tiene como objetivo proteger el medio ambiente mediante la reducción de las emisiones de gases fluorados de efecto invernadero (GFEI), para ello:

1. Establece normas sobre contención, uso, recuperación y destrucción de los GFEI.
2. Establece condiciones a la comercialización de productos y aparatos específicos que contenga GFEI o cuyo funcionamiento dependa de ellos.
3. Establece condiciones a usos específicos de GFEI.
4. Fija límites cuantitativos para la comercialización de HFC.

3.3.2.1 Contención

Prevención de emisiones de gases fluorados de efecto invernadero.

Se prohíbe la liberación intencionada de GFEI a la atmósfera, cuando no sea técnicamente necesario.

Se deberán tomar precauciones para evitar la liberación no intencional de fugas de dichos gases por parte de los operadores de los aparatos. En el momento en el que se detecte una fuga, los operarios deberán reparar dichas fugas sin demora injustificada.

Las personas físicas que lleven a cabo las tareas relativas a instalación, revisión, mantenimiento, reparación o desmontaje y controles de fugas de los aparatos fijos de refrigeración estarán certificadas con lo establecido a este Reglamento y adoptaran medidas preventivas para evitar dichas fugas.

3.3.2.2 Control de fugas

Los operadores de aparatos que contengan GFEI en cantidades equivalentes a 5 toneladas de CO₂ o más no incluidos en espumas, como es el caso de: aparatos fijos de refrigeración; aparatos fijos de aire acondicionado; bombas de calor fijas, etc., velarán por que dichos equipos sean objeto de control de fugas.

Dichos controles se efectuarán por personas físicas certificadas.

No estarán sujetos a control de fugas los aparatos sellados herméticamente que contengan GFEI inferiores a 10 toneladas equivalentes de CO₂, siempre que tales aparatos lleven una etiqueta indicando que están sellados herméticamente.

Hasta el 21 de Diciembre de 2016 no estarán sujetos a control de fugas los aparatos que contengan menos de 3 kg de GFEI o los aparatos sellados herméticamente que estén etiquetados en consecuencia y que contengan menos de 6 kg de GFEI.

3.3.2.3 Sistemas de detección de fugas

Los operadores de aparatos que contengan GFEI en cantidades de 500 toneladas equivalente de CO₂ o más velarán por que el aparato cuente con un sistema de detección de fugas que alerte al operador o a una empresa de mantenimiento de las eventuales fugas.

3.3.2.4 Recuperación

Los operadores de aparatos fijos o unidades de refrigeración y remolques frigoríficos, que contengan GFEI no contenidos en espumas velarán por que la recuperación de esos gases sea realizada por personas físicas cualificadas con los

certificados pertinentes, de tal modo que esos gases sean reciclados, regenerados o destruidos.

3.3.2.5 Formación y Certificación

Los Estados miembros establecerán o adaptarán programas de certificación que incluyan procesos de evaluación. Los Estados miembros reconocerán los certificados y certificaciones de formación expedidos en los demás Estados miembros. No limitarán la libertad de prestación de servicios ni la libertad de establecimiento porque un certificado haya sido expedido en otro Estado miembro.

3.3.2.6 Comercialización y control de uso

Restricciones a la comercialización

La comercialización de productos y aparatos enumerados en el anexo III del Reglamento, estará prohibida a partir de la fecha especificada en el mismo, diferenciando, cuando proceda, según el tipo o el potencial de calentamiento atmosférico de los GFEI. Entre las prohibiciones del citado anexo son de especial relevancia para el sector de la climatización:

1. A partir de 1 de enero de 2020.- Aparatos portátiles de aire acondicionado para espacios cerrados (aparatos sellados herméticamente que el usuario final puede cambiar de una habitación a otra) que contienen HFC con un PCA igual o superior a 150.
2. A partir de 1 de enero de 2025. Sistemas partidos simples de aire acondicionado que contengan menos de 3 kg de GFEI o cuyo funcionamiento dependa de ellos, con un PCA igual o superior a 750. 9

La Comisión podrá autorizar de modo excepcional, previa solicitud motivada de una autoridad competente de un Estado miembro, una exención de hasta 4 años, para permitir la comercialización de los productos y aparatos enumerados en el anexo III que contengan GFEI, en caso de que se haya demostrado que:

- a) Para un producto específico o una parte de aparato, o para una categoría específica de productos o aparatos, no se dispone de alternativas o no se puede recurrir a ellas por motivos técnicos o de seguridad
- b) El uso de alternativas técnicamente viables y seguras genera costes desproporcionados. A efectos de instalación, revisión, mantenimiento o reparación de aparatos, los GFEI solo podrán venderse a empresas que dispongan de las certificaciones correspondientes o bien podrán venderse a empresas que empleen a personas titulares de un certificado o de una certificación de formación.

Los aparatos que no estén herméticamente sellados y que estén cargados con GFEI sólo podrán venderse al usuario final cuando se aporten pruebas de que la instalación será realizada por una empresa certificada.

Etiquetado e Información sobre el Producto

Los aparatos de refrigeración; aparatos de aire acondicionado; bombas de calor, etc., que contengan gases fluorados de efecto invernadero o cuyo funcionamiento dependa de ellos no se comercializarán si no han sido etiquetados.

^{3/4} La etiqueta deberá contener, entre otra, la siguiente información:

1. Información de que el producto o aparato contiene GFEI o de que su funcionamiento depende de ellos.
2. Designación industrial aceptada de los GFEI o, si no se dispone de ella, la denominación química.
3. A partir de 1 de enero de 2017, la cantidad de GFEI incluidos en el producto o aparato, expresada en peso y en equivalente de CO₂, o la cantidad de GFEI para la cual haya sido designado el aparato, y el PCA de esos gases.
4. Cuando proceda, una referencia a que los GFEI están contenidos en un aparato sellado herméticamente. ^{3/4} La etiqueta será claramente legible e indeleble. ^{3/4} La etiqueta estará escrita en las lenguas oficiales de los

Estados miembros en que vaya a comercializarse el producto o aparato.

¾ La información, que según este Reglamento debe figurar en la etiqueta, se incluirá también en los manuales de instrucciones de los productos y aparatos de que se trate. ¾ En caso de los productos y aparatos que contengan GFEI con un PCA igual o superior a 150, esta información deberá incluirse también en las descripciones utilizadas para la publicidad.

Control del Uso

Quedará prohibido, a partir del 1 de enero de 2020, el uso de GFEI con un PCA 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. En relación con lo anterior, y para los GFEI regenerados y reciclados la citada prohibición no tendrá efecto hasta el 1 de enero de 2030.

Precarga de aparatos con hidrofluorocarburos

Desde el 1 de enero de 2017, los aparatos de refrigeración, aire acondicionado y bombas de calor cargados con HFC no serán comercializados salvo que los HFC cargados en estos aparatos se computen dentro del sistema de cuota referido en el capítulo IV de este Reglamento.

A partir del 1 de enero de 2018, en caso de que los HFC contenidos en aparatos no hayan sido comercializados antes de la carga de los aparatos, los importadores de los mismos se asegurarán de que la exactitud de la documentación y de la declaración de la conformidad sea verificada anualmente a más tardar el 31 de marzo para el año civil anterior, por un auditor independiente.

Los importadores de aparatos que comercialicen con aparatos precargados, en caso de que los HFC contenidos en ellos no hayan sido comercializados antes de la carga del aparato, se asegurarán de estar registrados según lo dispuesto en el artículo 17 apartado 1, letra e del Reglamento.

3.3.2.7 Reducción de la cantidad de hidrofluorocarbonos comercializados

La Comisión velará por que la cantidad de HFC que los productores e importadores tengan derecho a Los productores e importadores velarán por que la cantidad de HFC que cada uno de ellos comercialice.

La citada reducción no se aplicará a:

Los productores o importadores de menos de 100 toneladas equivalentes de CO₂ de HFC al año.

Los HFC directamente suministrados por un productor o importador a empresas para ser exportados fuera de la Unión Europea, siempre que tales HFC no sean puestos después a disposición de ningún tercero dentro de la unión, antes de la exportación.

Prevía solicitud motivada de una autoridad competente de un Estado miembro, la Comisión podrá, con carácter excepcional, autorizar mediante actos de ejecución una exención temporal de hasta cuatro años, para excluir del oportuno requisito de cuota a los HFC que vayan a utilizarse en aplicaciones específicas, o a categorías específicas de productos y aparatos cuando se haya demostrado que:

- Para esas aplicaciones, productos o aparatos en particular, no se dispone de alternativas o no puede recurrirse a ellas por motivos técnicos de seguridad.
- No puede asegurarse un suministro suficiente de HFC sin que ello genere cuotas desproporcionadas.

Asignación de cuotas de comercialización

A más tardar el 31 de octubre, la Comisión determinará de referencia basado en la media anual de las cantidades de HFC que el productor o importador haya notificado haber comercializado entre 2009 y 2012.

Los productores e importadores que no hubieran notificado ninguna comercialización con HFC podrán declarar su intención de comercializar HFC en el año siguiente. La declaración debe dirigirse a la Comisión especificando los tipos de HFC y cantidades que se prevé comercializar.

La Comisión publicará un anuncio de la fecha límite para la presentación de esas declaraciones. Antes de presentar una declaración, las empresas se inscribirán en el registro.

Registro

A más tardar el 1 de enero de 2015, la Comisión creará un registro electrónico de cuotas de comercialización de HFC y garantizará su funcionamiento (registro).

La inscripción será obligatoria para los productores e importadores de HFC. Asimismo, y a partir del 1 de enero de 2017, será obligatoria su inscripción para los importadores que comercialicen aparatos precargados, en caso de que los HFC contenidos en ellos no hayan sido comercializados en el mercado de la Unión antes de la carga de dicho aparato.

Transferencia de cuota

Todo productos o importador al que se le haya asignado una cuota podrá transferir dicha cuota en el oportuno registro, en relación con la totalidad o una parte de las cantidades, a otro productor o importador de la Unión o que esté representado en la Unión por un representante exclusivo.

3.3.2.8 Presentación de informes

Notificación de la producción. Cada importador de aparatos que comercialice aparatos pre aparato, presentará a la Comisión un documento de verificación.

Cada importador de aparatos que comercialice aparatos precargados, en caso de que los HFC contenidos en ellos no hayan sido comercializados en el mercado de la Unión antes de la carga del aparato, presentará a la Comisión el oportuno documento de verificación.

3.5 Sustitutos

Un refrigerante sustituto es aquel que tiene como objetivo reemplazar a otro refrigerante utilizado previamente en instalaciones de refrigeración ya que sus

características son prácticamente iguales a las del refrigerante sustituido, con lo que se consigue una eficiencia aproximada o igual para la misma instalación. Sin embargo, sus parámetros de Potencial de Calentamiento Atmosférico y Potencial de Agotamiento de la capa de Ozono son significativamente menores.

A continuación se mostrarán algunos fluidos refrigerantes utilizados como sustitutos con fecha límite a 31 de diciembre de 2021.

R-410A: Es un refrigerante fluorado libre de cloro y por lo tanto no produce ningún daño a la capa de ozono. Tiene una elevada eficiencia, es una mezcla única y por lo tanto facilita ahorros en los mantenimientos futuros. No es tóxico ni inflamable y es reciclable y reutilizable.

R-407A: Es una mezcla de gases refrigerantes HFC no azeotrópica, por lo que no produce ningún daño a la capa de ozono, bajo potencial de calentamiento atmosférico. Este gas es usado comúnmente en equipos nuevos que trabajen a temperaturas medias y bajas. También es un sustituto indirecto del R-502 y sus sustitutos HCFC como por ejemplo el R-22, R-408A, DI-44, HP80.

R-407F: Se trata de un gas HFC mezclado de bajo PCA y que ofrece un mayor coeficiente de rendimiento. Además, la sustitución del R-404A y el R-507 por el R-407F permite un ahorro del 10% en los costes y del 40% en las emisiones de CO₂.

R-449A: Es un refrigerante con base de hidrofluoro-olefina que no perjudica a la capa de ozono y posee un potencial de calentamiento atmosférico bajo, con un equilibrio óptimo de propiedades para sustituir a R-404A y al R-507 en aplicaciones industriales comerciales de expansión directa y desplazamiento positivo de temperaturas baja y media.

R-448A: Se trata de una mezcla de HFO y HFC que ofrece una mejor eficiencia energética (mayor que el R-449A y R-407F). No requiere inyección de líquido debido a la baja temperatura de descarga en las condiciones mostradas, a diferencia del R-407F y el R-407A

R-450A: Es una mezcla de 1234ze y 134a, trabaja como sustituto para el 134a en nuevas aplicaciones, incluyendo sistemas de refrigeración de alimentos,

transporte, enfriadoras de agua, procesos industriales de refrigeración, enfriadoras centrífugas, congeladores y procesos de aire acondicionado industrial.

4. Bomba de calor/refrigeración a chorro de vapor R851.

4.1 Justificación del modelo escogido.

El sistema escogido es un sistema de refrigeración mediante eyección de vapor para uso docente que no proporciona una alta refrigeración y que es menos costoso que un sistema de refrigeración por absorción.

4.2 Descripción de la máquina.

Este equipo es una máquina de refrigeración o bomba de calor sobre banco que trabaja mediante el principio de chorro de vapor como medio de propulsión. Totalmente instrumentado, esta máquina es capaz de operar a partir de agua caliente provista de un calentador integral o mediante paneles solares. Dicha máquina fue desarrollada en Agosto de 1992 por la empresa P.A. Hilton LTD.

4.3 Diagrama esquemático.

A continuación se mostrarán los esquemas de los componentes de la máquina, del disyuntor de corriente y del transformador.

Diagrama esquemático de componentes

R851 BOMBA DE CALOR/REFRIGERACION A CHORRO DE VAPOR

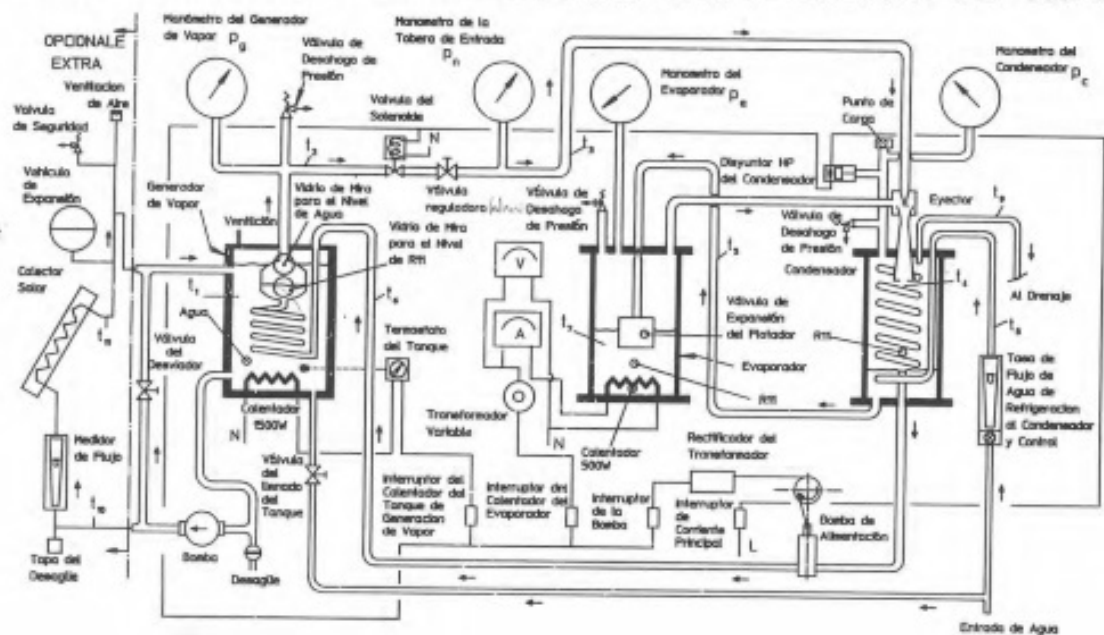


Figura 8: Diagrama de componentes de la máquina por eyección de vapor R851

Diagrama esquemático del disyuntor de corriente residual

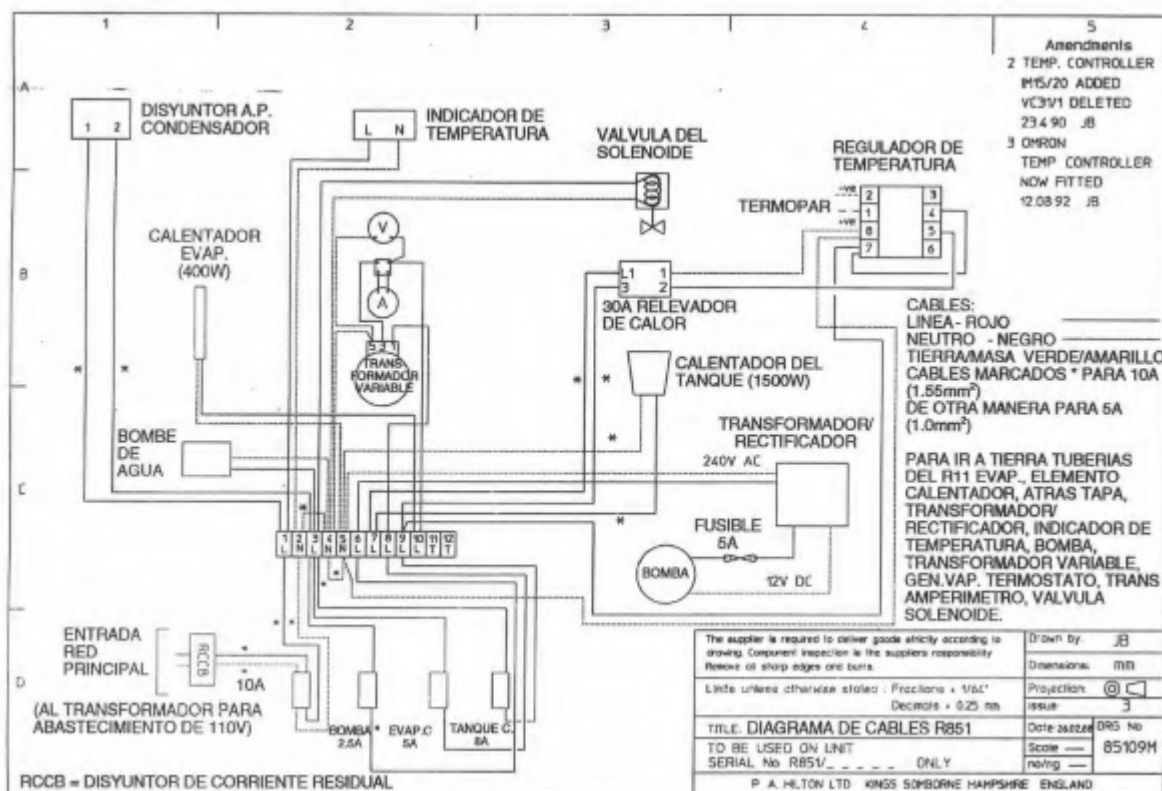


Figura 9: Diagrama esquemático del disyuntor de corriente residual

Diagrama de conexiones del transformador a unidades de 110/120 Voltios.

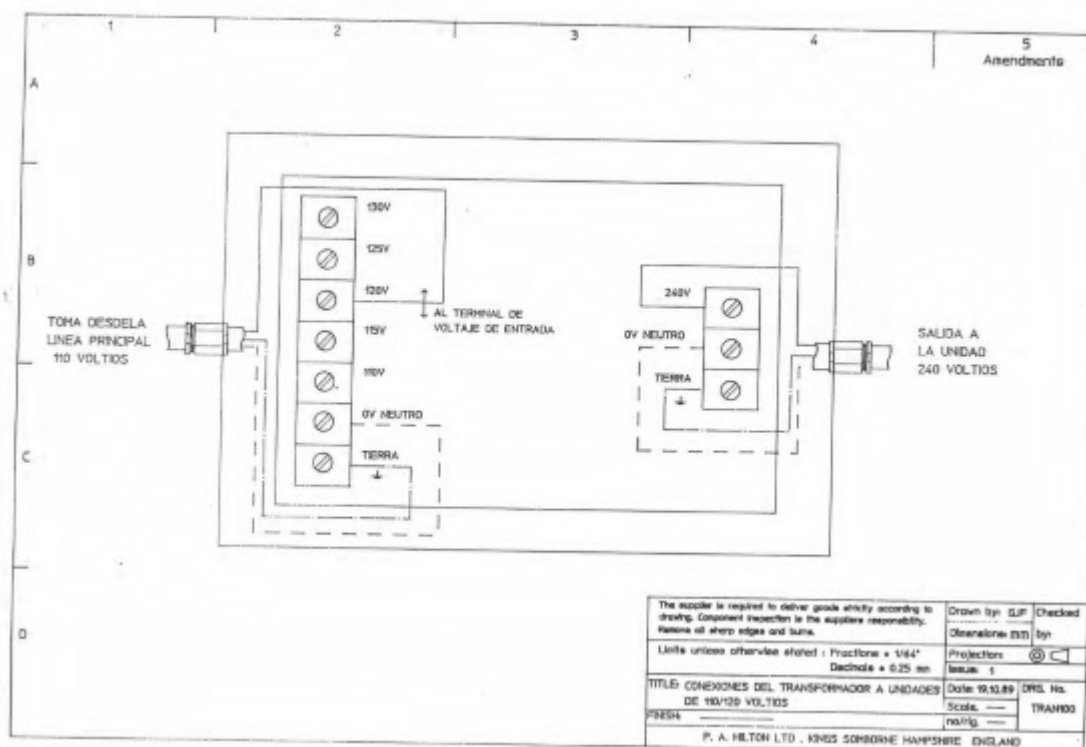


Figura 10: Diagrama de conexiones del transformador

4.4 Especificaciones.

1. Panel: GPR de alta calidad donde todos los componentes están montados y con conexiones para poder conectarse a paneles solares opcionales.
2. Tanque calentador: Tanque aislado de acero inoxidable con indicador de nivel de agua y equipado con un calentador de inmersión de 1.5 kW controlado termostáticamente.
3. Generador de vapor: Cuerpo cilíndrico de acero inoxidable con serpentín de precalentamiento y miras de vidrio.
4. Eyector/Termo-Compresor: Tobera convergente-divergente cuya garganta es de 1,7 mm de diámetro. Difusor de cono de combinación de secciones paralelas y divergentes
5. Evaporador: Cilíndrico con paredes de vidrio alojando un calentador de inmersión de 500 W y una válvula flotante de expansión.
6. Condensador: Cilíndrico con paredes de vidrio, conteniendo un serpentín de condensación enfriado por agua.
7. Bomba de alimentación: Bomba de pistón de actuación individual de 12 V D.C.
8. Instrumentación
9. Temperatura: Indicador digital de 12 vías que mide 8 temperaturas importantes en K.
10. Flujo: Medidor de flujo de área variable equipado con una válvula de control para flujo de agua a través del condensador.
11. Presión: Cuatro medidores de pantalla para medir presiones importantes.
12. Ingreso al evaporador: Voltímetro (0 a 250 V) y amperímetro (0 a 3 A)
13. Seguridad: Válvula de desahogo ajustada al generador de vapor, evaporador y condensador. Disyuntor de alta presión ajustado al condensador que cierra todos los calentadores y aísla el generador de vapor. Protección contra sobre temperaturas ajustada a los calentadores. Interruptores cortadores de circuito montados en todos los circuitos. D.C.R. montado.

4.5 Dimensiones.

Altura: 0.925 mm

Ancho: 1.060 mm

Profundidad: 0.43 mm

Peso: 75 kg

4.6 Servicios requeridos.

Pueden ser de dos tipos:

1. 2.5 kW 220/240 V, monofásico, 50 Hz (Con tierra/masa)
2. 2.5 kW 110/120 V, monofásico, 60 Hz (Con tierra/masa). En esta opción se debe de proveer de un transformador.

En ambos casos necesita de un suministro de agua fría a: 4.5 litros/min a 15 m a 22°C de máxima.

4.7 Dispositivos de seguridad.

El equipo cuenta con los siguientes dispositivos de seguridad:

1. Interruptor del Disyuntor: Si la presión del condensador excede 240 kPa en el manómetro, este interruptor hará lo siguiente
 - I. Apagará el calentador del generador de vapor.
 - II. Apagará el calentador del evaporador
 - III. Cerrará la válvula de solenoide en la salida del generador de vapor.
 - IV. Apagará la bomba de alimentación.
 - V. El interruptor re-conecta automáticamente cuando la presión se reduzca.
2. Una válvula de desahogo con resorte que está ajustada a :
 - I. El generador de vapor, cuya presión de trabajo es de 700 kPa.
 - II. El condensador que opera a 250 kPa.

Estos elementos descargan vapor a la atmósfera si la presión normal de trabajo es excedida

3. El elemento del calentador eléctrico en el tanque de calentamiento del generador de vapor tiene un interruptor térmico que opera si está al descubierto y se sobrecalienta. Dicho interruptor se reactiva cuando el elemento se enfría.
4. El elemento del calentador eléctrico en el evaporador tiene un fusible térmico el cual va a fallar si el elemento queda al descubierto y se recalienta.

4.8 Instalación.

1. Se saca la unidad de la caja de embalaje y se coloca sobre un banco o mesa cerca de las instalaciones de agua y electricidad.
2. Si la unidad va a ser calentada por energía solar se debe también emplazarse de manera que la cañería que se dirija al punto de emplazamiento del colector sea lo más corta posible.
3. Los materiales del embalaje no deberán destruirse hasta que la lista de embalaje haya sido revisada.
4. Examinar todos los componentes por daño. Si hubiera algún daño se debe notificar a los aseguradores.

4.9 Conexiones eléctricas.

Conectar el cable que sale de la parte posterior de la unidad a la red eléctrica local directamente usando un enchufe con fusible para 13 A

El cable marrón deberá conectarse a la línea, el azul al neutral y el verde/amarillo a la tierra

4.10 Abastecimiento de agua.

1. Conectar el abastecimiento de agua fría local a la terminación atornillable de la cañería en la esquina inferior izquierda del panel posterior. Dicho abastecimiento debe ser tan fría como sea posible. El flujo requerido es de 3 litros/min.

2. Dirigir la manguera de plástico al ingreso de agua hacia un punto de drenaje adecuado
3. Abrir las llaves de agua en la cañería principal y en el medido de flujo de agua y verificar que la tasa de flujo requerida pueda alcanzarse.
4. Llenar el tanque de calentamiento del generador de vapor
5. Sólo se aplica si no hay un sistema solar opcional, se realiza de la siguiente manera:
6. Verificar que la válvula de desvío esté abierta, luego verificar que la llave del drenaje esté cerrada y finalmente, abrir la válvula de llenado al fondo del generador de vapor y llene el tanque hasta que el nivel de agua aparezca en el vidrio de mira superior. Cerrar la válvula de llenado.

4.11 Cargar el refrigerante.

En condiciones normales de operación el nivel del líquido debe ser:

1. Aproximadamente 20 mm desde el fondo del cilindro de vidrio del condensador.
2. Un poco sobre la posición media en el cilindro de vidrio del evaporador.
3. Dentro del vidrio de mira de observación inferior en el generador de vapor.
4. Si la unidad está cargada correctamente y trabajando de manera continua, dichas posiciones se mantienen de manera automática
5. Si la unidad no ha sido usada, el refrigerante tiende a migrar de una parte del sistema a otra a medida que varía la temperatura. Siempre que la unidad tenga la carga correcta, la distribución se conseguirá luego de un breve periodo en carga.

El sistema debe ser cargado del modo siguiente:

1. El punto de carga será encontrado detrás del panel, un poco más arriba que el condensador.
2. Se abre la llave de enfriamiento del condensador al máximo asegurando que la válvula de carga está cerrada, entonces se remueve la tapa moleteada.
3. Usando la manguera, se conecta el cilindro de refrigerante al punto de carga, se abre la válvula de carga y el líquido comenzará a fluir dentro del

condensador. El aire se debe evacuar desde el condensador tirando suavemente de la válvula de desahogo.

4. Cuando el condensador se ha llenado hasta la mitad, la bomba de alimentación deberá encenderse para que se transfiera el líquido desde el condensador hasta el generador de vapor. No se debe encender el generador de vapor en esta etapa.

El procedimiento se puede repetir hasta que el sistema esté cargado.

4.12 Cebado de la bomba de circulación de agua.

Cuando el interruptor principal esté cerrado la bomba de circulación debería funcionar silenciosamente causando una agitación del agua que puede ser vista a través de la mira de vidrio al nivel del agua en el tanque de calentamiento.

Si la bomba es ruidosa es porque hay aire atrapado y va a necesitar ser purgado del modo siguiente.

1. Apagar los interruptores de las líneas principales.
2. En el cuerpo de la bomba de circulación hay un pequeño tornillo de cabeza ranurada. Dicho tornillo se debe desatornillar y cualquier aire en la bomba debe dejarse escapar.
3. Apretar el tornillo y encender las líneas principales.
4. Verificar que la bomba opera silenciosamente y que la agitación puede verse, en caso contrario repetir los anteriores procedimientos.
5. Verificar el nivel de agua en el tanque de calentamiento.

4.13 Problemas de cavitación en la bomba.

La cavitación puede ser problemático en bombas que requieren manejar líquidos cercanos a su temperatura de saturación.

Cuando la presión del líquido saturado se reduce, para mantener el equilibrio térmico, parte del líquido explota en vapor produciendo “cavidades” llenadas con vapor saturado.

Los líquidos subenfriados pueden tolerar una caída de presión antes de saturarse, y líquidos entrando en una bomba deberían estar en esta condición para reducir los problemas de cavitación.

Debido a la resistencia de la fontanería y válvula de succión, hay una significativa caída de presión en el líquido refrigerante cuando entra a la válvula de alimentación. Por tanto el subenfriamiento es esencial si la cavitación quiere evitarse.

Bajo condiciones normales y estables de operación, el líquido refrigerante fluyendo del condensador a la bomba de alimentación es subenfriado y no es probable que se presenten problemas.

Sin embargo debido a una operación incorrecta de la unidad, o por otras razones, puede ocurrir cavitación en dos situaciones:

1. Al comenzar de frío, que es cuando todo el líquido refrigerante es líquido saturado
2. Por una súbita reducción de presión en el condensador, esto puede deberse a un rápido incremento del flujo de agua de refrigeración, por ejemplo.

4.12.1 Cavitación empezando de frío.

El fallo de la bomba va a notarse por la ausencia de movimiento de líquido refrigerante del condensador al generador de vapor y por una baja presión del generador. Se pueden tomar las siguientes medidas:

1. No permitir que la bomba de alimentación funcione por un periodo prolongado en esta condición ya que su temperatura va a subir y esto producirá cavitación.
2. Si el nivel de líquido refrigerante en el evaporador está sobre el nivel del elemento de calentamiento, conecte el calentador del evaporador y ajuste el ingreso de calor en 200 a 300 W. Esto empuja el vapor del condensador, donde en conjunto con un bajo flujo de agua de refrigeración, hará subir la presión y pondrá en marcha la bomba. No permitir que el elemento calentador quede al descubierto.

3. Si la medida 2 falla o no puede usarse, permita el ingreso de aire al condensador de una de estas formas:
 - I. Tirando del vástago de la válvula de desahogo si la presión del condensador es más baja que la atmosférica.
 - II. Conectando una pequeña bomba de mano al punto de carga del líquido refrigerante.
 - III. Poner en marcha la bomba de alimentación y cuando la unidad esté funcionando normalmente, el aire podrá ser descargado a través de la válvula de desahogo.

4.12.2 Cavitación debido a la reducción de la presión del condensador.

Se puede solventar de las siguientes maneras:

1. Invertir inmediatamente la acción que causó la reducción de presión del condensador, en particular reducir el flujo de agua de refrigeración del condensador y abrir completamente la válvula de admisión. Estas acciones han de ser tomadas rápidamente antes de que el líquido en el generador de vapor se evapore.
2. Si dicha acción falla en restablecer la acción de la bomba, la acción 2 de la sección anterior debe ser tomada.
3. Si la acción anterior falla, la acción 3) de la anterior sección debe ser tomada.

4.14 Operación.

1. Asegurar que la unidad está correctamente llena con líquido refrigerante y conectado a los servicios de electricidad y agua. Verificar que el tanque calentador del generador de vapor está lleno correctamente con agua.
2. Asegurar que los interruptores estén apagados y que la válvula de admisión esté cerrada.
3. Encienda el interruptor principal, que hará funcionar la bomba de circulación e iluminará el indicador de temperatura.
4. Ajuste el indicador de temperatura.

5. Observar la presión del condensador.
6. Fijar el control de temperatura del agua del generador de vapor y poner en marcha el calentador del tanque.
7. Si el nivel del evaporador es alto:
 - I. Poner en marcha el calentador del evaporador y fije el ingreso de calor en aproximadamente 150 W. El fluido refrigerante hervirá y transferirá al condensador donde la presión subirá.
 - II. Abrir ligeramente la válvula de control del agua de enfriamiento de modo que la presión del condensador suba.
 - III. Tan pronto como el nivel en el evaporador sea normal, apagar el calentador y cerrar la llave de agua de refrigeración del condensador.
8. Si el nivel en el evaporador es bajo, no tomar ninguna acción.
9. Cuando la presión del generador alcance la presión deseada, lentamente abrir por completo la válvula de admisión
10. Ajustar el flujo de agua de enfriamiento de modo que la presión del condensador sea 20 o 30 kPa sobre el valor inicial.
11. Poner en marcha la bomba de alimentación.
12. La unidad debería operar normalmente. La temperatura del tanque, el ingreso de calor del evaporador y la presión del condensador podrán fijarse ahora en los valores deseados.
13. Hay que tener en cuenta que para evitar la cavitación, el incremento del flujo de agua de refrigeración y/o cierre de la válvula de admisión deberá hacerse gradualmente.
14. También durante el periodo de calentamiento, puede ser necesario purgar aire del sistema. Para ello se incrementa la presión del condensador por encima de la atmosférica y entonces se tira del vástago de la válvula de desahogo por dos o tres segundos.

4.15 Cierre.

1. Apagar el calentador del tanque
2. Apagar el calentador del evaporador

3. A medida que baja la presión del generador, reducir el flujo de agua de enfriamiento del condensador para mantener la presión del condensador.
4. Cuando la temperatura del tanque ha caído, apagar los interruptores de las redes principales y de la bomba de alimentación
5. Cerrar la válvula de admisión
6. Cerrar la llave de agua de refrigeración.
7. Separarla de las redes principales.

4.16 Cuidados.

1. El disyuntor de alta presión del condensador está fijado para trabajar si la presión en el condensador excede 240 kPa. Cuando opera:
2. Se cierra la válvula de solenoide.
3. Se detiene la bomba de alimentación.
4. El calentador del tanque y el evaporador son apagados.
5. Presiones excesivas se deben a una de estas razones
6. No existe suficiente flujo de agua de refrigeración.
7. Temperatura excesiva del agua de refrigeración
8. Presencia de aire en el condensador.
9. Las válvulas de desahogo de presión en el generador de vapor y en el condensador están ajustadas para descargar a 700 kPa y 250 kPa respectivamente. No se deben cambiar.
10. Siempre se separa la unidad de las redes principales, antes de remover el panel posterior.
11. La temperatura del agua en el tanque de calentamiento no debe dejarse subir a más de 97°C, en caso contrario vapor y agua caliente pueden ser expulsados a través de la ventilación del tanque.
12. Si el elemento calentador del evaporador está descubierto de líquido refrigerante, rápidamente se recalentará y fallará. Bajo condiciones normales de operación el nivel en el evaporador es mantenido automáticamente, pero debido a migración, el nivel podrá ser bajo cuando se comienza de frío. El calentador del evaporador no debe ser encendido hasta que el elemento esté cubierto.

13. Verificar que el nivel de agua en el tanque de calentamiento este dentro del vidrio de mira superior en el tanque de calentamiento mientras está en funcionamiento.
14. Ocasionalmente verificar que el sensor de temperatura a la salida del eyector está ubicado correctamente. Su extremo debe estar a 3 mm de la cara del difusor y dentro de la corriente de fluido refrigerante que sale. La posición de dicho sensor puede ajustarse aflojando la tuerca de unión a través de la cual pasa.

4.17 Mantenimiento.

4.17.1 Detección de fugas.

Una fuga puede detectarse si:

1. Si hay una reducción en el contenido de líquido del sistema.
2. Si es necesario ventilar aire frecuentemente del condensador mientras está en operación. a fin de mantener la presión en el valor esperado.

Las fugas pueden detectarse de la siguiente manera:

1. Con la unidad “fría” pero que contenga algo de líquido refrigerante:
 - I. Encienda las redes principales.
 - II. Circule agua de refrigeración a través del condensador.
 - III. Conecte una bomba de aire de operación manual, como una de neumáticos de automóvil o de bicicletas al punto de carga e incremente la presión en el sistema hasta la medida en el manómetro de 50 kPa

Ubicar la fuga aplicando en cada unión, cualquiera de estas opciones:

1. Una solución de jabón.
2. Una lluvia de espuma de aerosol para detección de fugas.
3. Una lámpara de haloidea.
4. Un detector electrónico de fugas.

Con la unidad operando normalmente en carga:

1. Reduzca el agua de refrigeración en el condensador.
2. Cierre parcialmente la válvula de admisión hasta que la presión de ingreso de la tobera sea de 250 kPa en el manómetro.
3. Incremente la entrada de calor al evaporador hasta que la presión en él sea justo sobre la presión atmosférica.
4. Cuando ya se ha localizado la fuga y se ha reparado, se procede a cargarse tal y como se describió en la sección tal.

4.18 Bomba de alimentación.

4.18.1 Lubricación.

El motor de la bomba de alimentación y las marchas son lubricadas con grasa al ensamblar y no deberían requerir de atención.

4.18.2 Empaquetadura.

La empaquetadura de la válvula de alimentación es de un tipo flexible especialmente diseñado y no debe ser sobreapretado. Las fugas producidas en la empaquetadura van a ser indicadas por una pérdida de carga de fluido refrigerante. Si esto sucede, entonces se debe apretar por no más de 45° cada vez. Si la empaquetadura está muy apretada, se gastará rápidamente y se sobrecalentará el motor. Después de haberse ajustado la empaquetadura, verificar que la lectura en el amperímetro situado en el extremo izquierdo no exceda los 3 A cuando trabaje a máxima presión.

4.18.3 Válvulas de retención.

Para limpiar se aísla la unidad y se drena el líquido refrigerante. Se desconecta las cañerías de succión y entrega y luego se desarma y se limpia las válvulas de succión y entrega, cuidando de no perder los pequeños resortes cuando se abran las válvulas.

4.18.4 Filtros.

Filtros de medición fina están incorporados dentro de las cañerías en las siguientes ubicaciones:

1. A la entrada de la válvula de succión de la bomba de alimentación.

2. A la entrada de líquido de la válvula de flotación ubicada en el extremo superior del evaporador.

Estos filtros se pueden sacar para limpiar desatornillando la tuerca hexagonal de unión, después de lo cual el filtro podrá ser removido.

4.19 Drenado de líquido refrigerante.

Si fuera necesario drenar el líquido refrigerante del sistema:

1. Si es posible haga funcionar la unidad y cierre del modo ya descrito en la sección tal
2. La unidad se debe aislar de las redes principales
3. Haga circular agua caliente a través del condensador de modo tal que el R11 se enfríe tanto como sea posible.
4. Se ha de poner un recipiente limpio debajo del condensador, luego se remueve la tapa moleteada. Una manguera de plástico puede ser utilizada para dirigir el fluido refrigerante si es necesario.
5. Se tira del pistón de la válvula de desahogo para dejar entrar aire al condensador mientras el fluido refrigerante fluye hacia afuera.
6. Luego una vez extraído todo el fluido refrigerante se podrá guardar en un contenedor resistente de tapa atornillada a temperaturas de hasta 25°C.

4.20 Drenado de agua.

Cuando sea necesario vaciar el agua del generador de vapor:

1. Se aísla la unidad de la red eléctrica.
2. Se deja enfriar la unidad.
3. El grifo de drenaje se encuentra sobresaliendo a través del fondo al centro del panel posterior. Se abre el grifo y se deja fluir el agua hacia el exterior.
4. Si el sistema de colector solar está conectado, el sistema debe ser drenado desde el punto más bajo y se debe dejar entrar aire al punto más alto.

4.21 Reemplazo del elemento calentador en el evaporador

El elemento calentador del evaporador lleva incorporado un fusible térmico el cual fallará si el elemento se sobrecalienta por operar sin estar inmerso en el fluido refrigerante.

Si dicho elemento falla en su operación:

1. Se drena el fluido refrigerante y se aísla de la red eléctrica.
2. Se saca el panel posterior y se desconecta el elemento calentador del evaporador de sus terminales.
3. Antes de sacar el elemento use un medidor para verificar por continuidad. Si hay un circuito abierto el elemento debe ser reemplazado del modo siguiente.
4. Se desatornilla las dos tuercas y se saca la placa empotrada que asegura el elemento en la cubierta inferior del evaporador.
5. Se saca el elemento y su anillo “O” y se descarta.
6. Se lubrica el nuevo anillo “O” y se encaja en su hendidura. Se inserta el nuevo elemento y se asegura con la placa de sujeción y las tuercas.
7. Se conecta el elemento a sus terminales, se reemplaza la cubierta posterior, se vuelve a llenar la unidad con fluido refrigerante y se prueba para comprobar que funciona correctamente.

4.22 Disyuntor de corriente residual.

Cada tres meses el disyuntor de corriente residual debe ser revisado por una persona competente. Para hacer esto, se remueve el panel posterior y se verifica que el disyuntor está en la posición de “ENCENDIDO”. Se enciende la corriente en la red y en el pequeño interruptor corta circuito en el panel. Se empuja el botón marcado “T” en el disyuntor y se vuela a la posición “OFF” y que el neón no está iluminado, lo que indica que la unidad está aislada desde el disyuntor en adelante. Si la corriente sigue encendida, el disyuntor está fallado y se necesita reemplazar por un electricista cualificado.

5. Definición de los ensayos realizados

Para la realización del ensayo, la máquina contaba con un refrigerante sustituto del R11 llamado R245fa.

El R245fa es un refrigerante de tipo HFC, por lo que no es perjudicial para la capa de ozono y tiene un potencial de calentamiento atmosférico de 950, que lo hace utilizable por la normativa. Se procederá a usar un ensayo que se ha realizado previamente con este refrigerante.

Dichos resultados se compararán con el refrigerante que usaba originalmente la máquina, el R11, para ello se usará un software llamado Termograf ya que el R11 está prohibido. Para el caso del R11 se usará como comparación al R245fa un ensayo realizado por la propia empresa que se encuentra en el manual de instalación.

5.1 Propiedades de los refrigerantes seleccionados

Propiedades	R11	R245fa
Fórmula Química	CCl_3F	$\text{C}_3\text{H}_3\text{F}_5$
Masa Molar	137.36 g/mol	134.05 g/mol
Densidad en estado líquido	1478.33 kg/m ³	1404.1 kg/m ³
Densidad en estado vapor	5.8531 kg/m ³	5.84 kg/m ³
Temperatura de ebullición	296.2 K	288.4 K

Para los ensayos se ha tenido en cuenta las siguientes suposiciones:

1. Pérdida de calor hacia los exteriores insignificante.
2. Energía cinética y potencial despreciable.
3. No se ha activado en ningún momento la resistencia eléctrica, por lo que su potencia $W=V \cdot I=0$.

4. Existe una transferencia de calor con el medio ambiente de $1.8 \cdot 10^{-3}$ kW por cada grado centígrado de diferencia de temperaturas entre la de saturación en el condensador y el ambiente
5. Tanto la bomba como el eyector son isoentrópicos.

5.2 Realización de los ensayos

Para la realización del ensayo con la máquina de refrigeración cuyo refrigerante es el R245fa se procedió de la siguiente manera:

1. Encender el interruptor principal.
2. Ajustar el indicador de temperatura en la estación 1.
3. Regular con el termostato la temperatura del agua del generador de vapor y encender el calentador del tanque.
4. Cuando la presión en el generador de vapor alcance 200 kPa abrir muy lentamente la válvula de admisión.
5. Ajustar el flujo de agua, que en este caso se abrió totalmente.
6. Encender la bomba de alimentación.

Para la simulación de resultados con el R11 se recurrió al software Termograf, que es un simulador desarrollado por la Universidad de Zaragoza para facilitar la enseñanza de la termodinámica. Dicho simulador incluye:

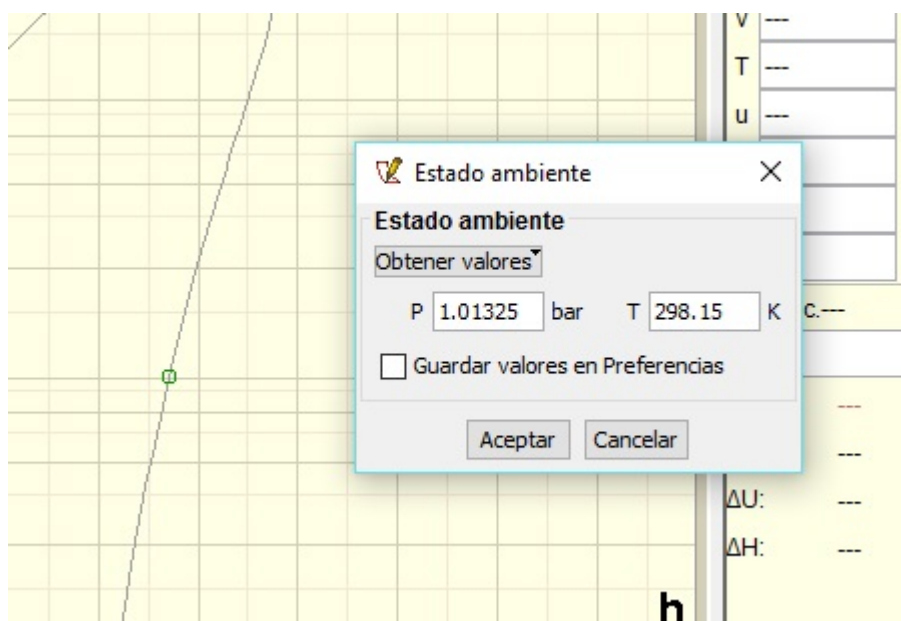
1. Cálculo de propiedades termodinámicas dibujando los estados, procesos y ciclos directamente sobre el diagrama termodinámico.
2. Creación de gráficas y diagramas termodinámicos en tiempo real, fácilmente insertables como imágenes en otros documentos.
3. Configuración de sustancias, unidades, convenio de signos, etc.
4. Creación de tablas termodinámicas con análisis gráfico para, por ejemplo, la optimización de un ciclo.
5. Cálculo de intercambiadores de calor y rendimientos de ciclos.
6. Balances de energía y entropía, con análisis de trabajos e irreversibilidades.
7. Editor de ecuaciones para funciones termodinámicas personalizadas con variables de usuario y gráficas personalizadas.
8. Traducido a 10 idiomas (contacte con nosotros para más traducciones).

9. Multi-plataforma (Linux, Windows, Macintosh, navegador web, etc).

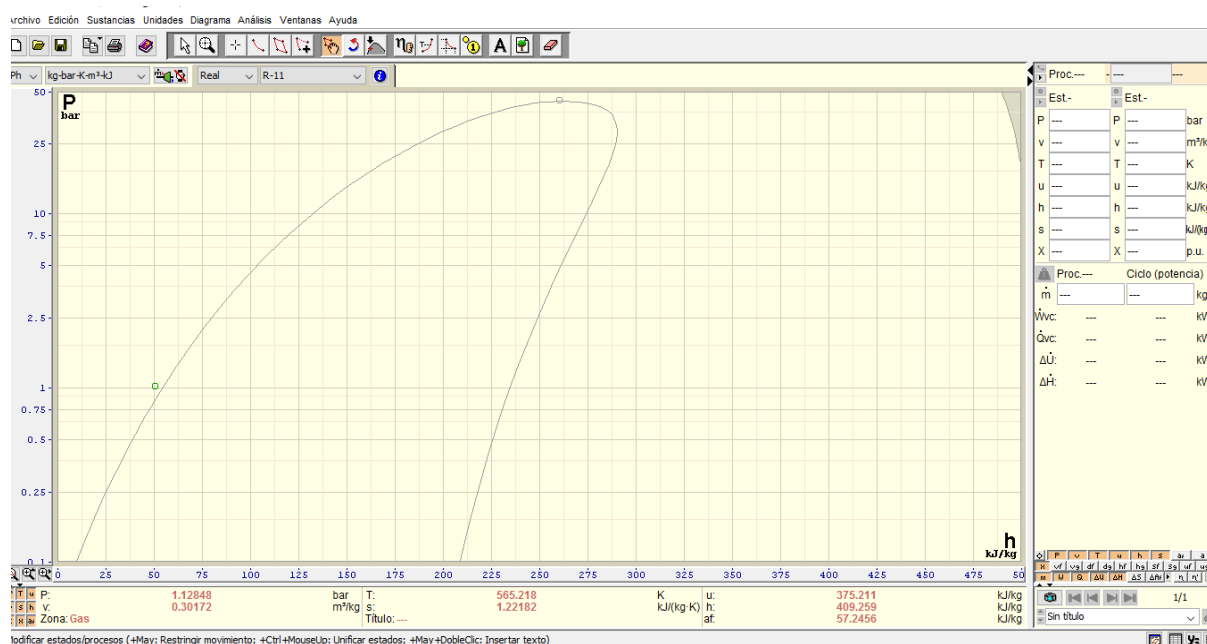
Para más información, visitar su página web:
termograf.unizar.es/www/index.htm

Para la realización del caso, se explicó que se mantuvo igual la presión en el evaporador y en el generador de vapor y que la salida del evaporador sea vapor saturado, para ello se procedió de la siguiente manera:

1. Abrimos Termograf.
2. Seleccionamos en la ventana superior el diagrama P-h, las unidades vienen por defecto en bar y kJ/kg.
3. Seleccionamos en análisis de sistema las pestañas volumen de control y potencia.
4. A continuación en el modelo de gas seleccionamos “Real” y “R-11”.
5. En el eje de las presiones hacemos clic con el botón derecho del ratón y seleccionamos “logarítmica” para cambiar ese eje a escala logarítmica, se puede observar también un cambio en la curva de saturación.
6. Hacemos doble clic sobre la circunferencia verde, que marca el ambiente y lo ajustamos a 1.013 bar y 298.15 K.

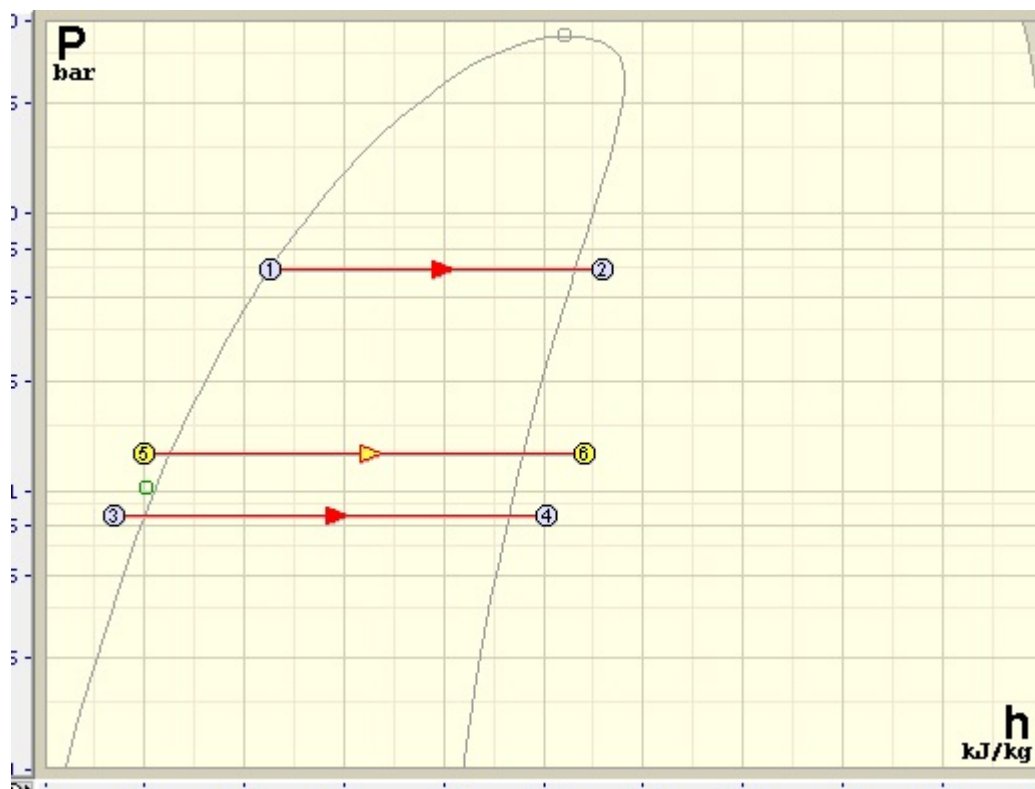


Debe quedar de la siguiente manera:

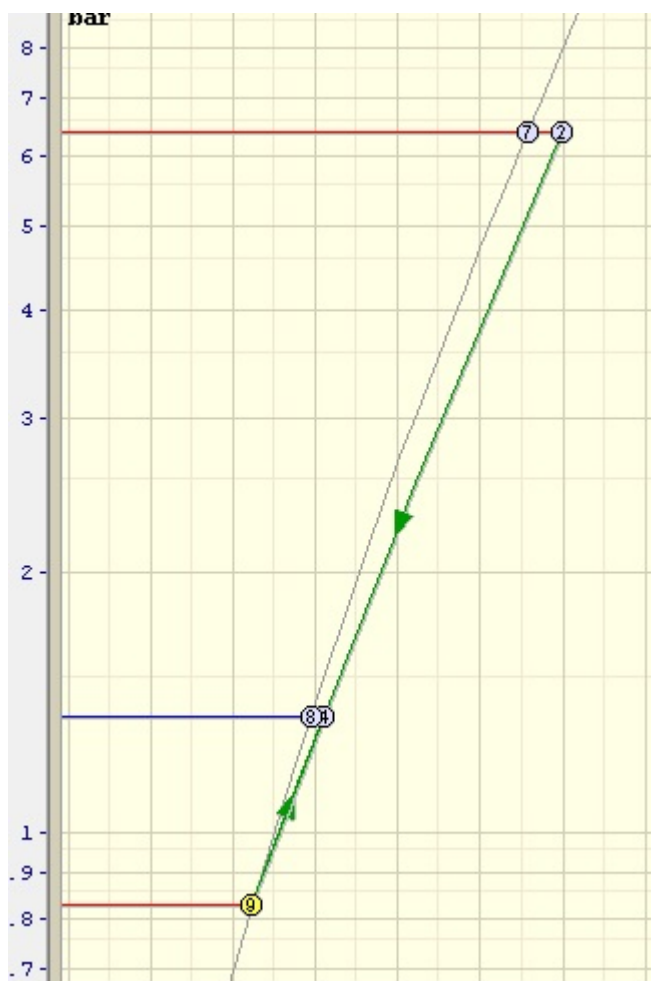


Para la realización del caso se procede de la siguiente forma:

1. Hacemos clic en “Nuevo proceso” seleccionamos isóbaro y ajustamos los puntos, que para el caso líquido es de 6.42 bar y 289.31 K, dicho proceso se llamará 1 y 2 por el momento.
2. Volvemos a seleccionar “Nuevo proceso” eligiendo isoentálpico, pinchamos sobre el punto de líquido saturado y seleccionamos en el nuevo punto la presión del evaporador, que es de 0.82 bar, dichos puntos son 3 y 4. Luego con otra línea isóbara en el evaporador llegamos hasta el punto de vapor saturado, haciendo el título $X=1$, el punto de vapor saturado, dichos puntos son 5 y 6.



3. El punto 4 lo ajustamos a la línea de saturación imponiendo el título $X=1$, después, creamos un proceso adiabático desde el punto 4 al punto 2, luego hacemos clic en invertir proceso y hacemos clic en la flecha de dirección de dicho proceso, luego en “Menú proceso” seleccionamos “Reversible tobera”.
4. Creamos otro proceso adiabático desde el punto de salida el evaporador hasta la presión del condensador, en “Menú proceso” seleccionamos “Reversible Difusor”.
5. Unimos los puntos con el comando “Modificar” pulsando la tecla ctrl y arrastrando a los puntos que queremos unir.
6. Hacemos clic en “Numeración de estados” para renumerar los estados, la numeración de estados se mostrará más adelante.
7. Creamos los puntos de saturación del generador, evaporador y condensador con el comando “Nuevo estado”, imponemos en cada caso la presión indicada y el título $X=1$.



Una consideración a tener en cuenta es que en cada proceso se puede poner el flujo de refrigerante que recorre en cada proceso así como calcular la eficiencia en el programa. Sin embargo, no se ha tenido en cuenta debido a que el cálculo de los flujos de refrigerante así como de las eficiencias están mostradas a continuación, así que solo se ha creado el ciclo para tomar datos de entalpías, entropías, presión y temperatura para cada punto.

La numeración de estados así como los resultados obtenidos pueden verse en el próximo apartado.

5.3 Resultados obtenidos

5.3.1 Diagrama P-h

Los ciclos termodinámicos obtenidos para un diagrama P-h son los siguientes:

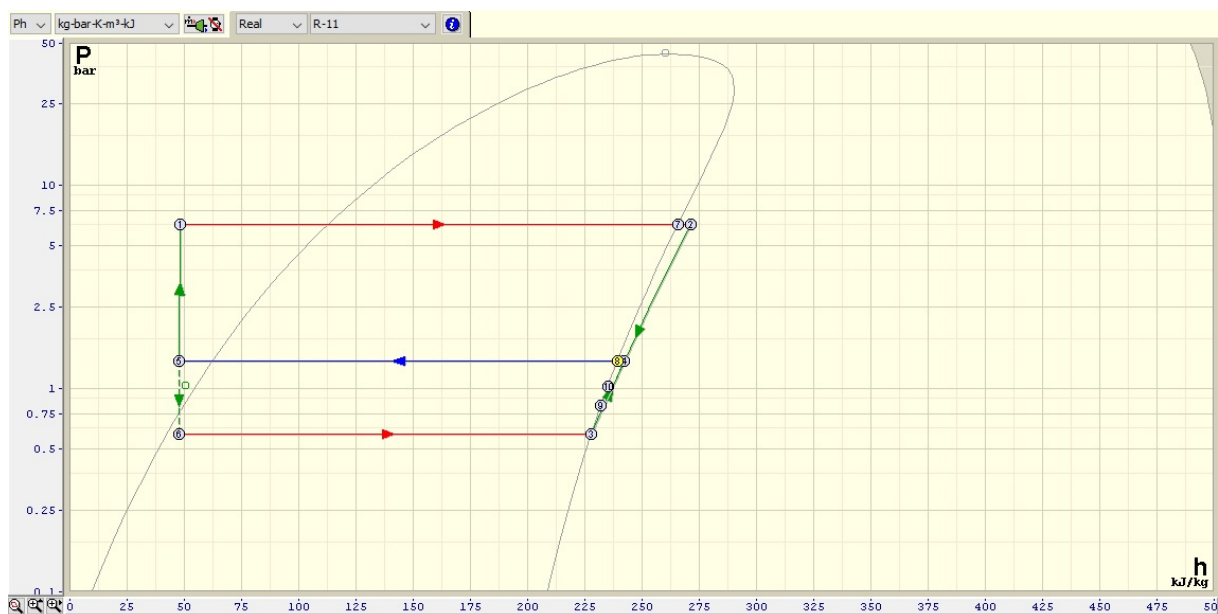


Figura 11: Diagrama P-h de la simulación de refrigeración con R-11

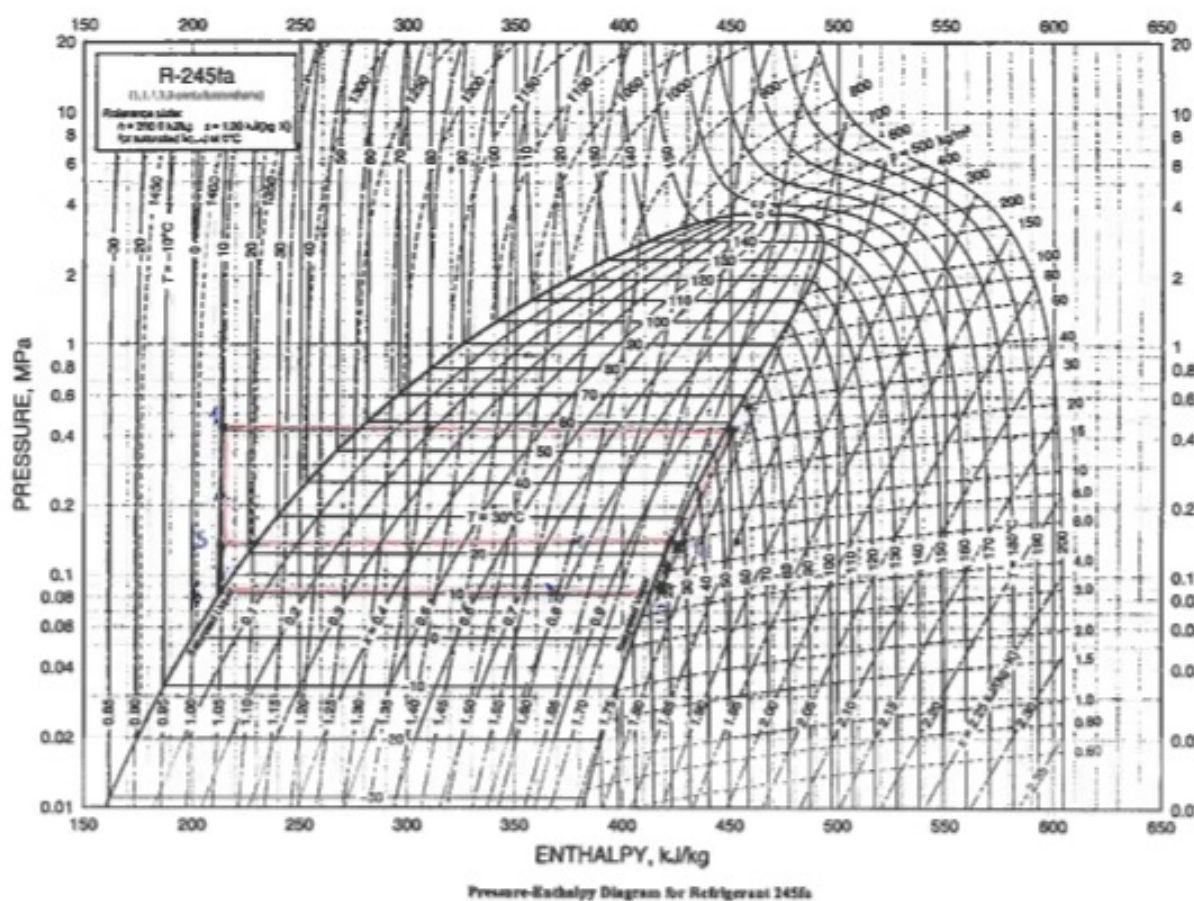


Figura 12: Diagrama P-h del ensayo con R245fa

5.3.2 Presiones, Temperaturas, Entalpías y Entropías de todos los puntos

Para el R245fa

Punto	Presión (bar)	Temperatura (K)	Entalpía (kJ/kg)	Entropía (kJ/kgK)
Ambiente	1,01	288,00	419,00	1,80
1 Entrada GV	4,10	285,90	228,00	1,05
2 Salida GV	4,10	332,60	450,00	1,78
2' Entrada Tobera	4,10	328,80	447,00	1,77
3 Entrada Difusor/Salida evaporador	0,82	285,90	420,00	1,77
4 Entrada Condensador	1,41	314,70	430,00	6,24
5 Salida Condensador	1,41	292,70	213,00	1,05
6 Entrada Evaporador	0,82	285,90	217,00	1,05
Pgv (Vapor saturado)	4,10	332,60	448,00	1,78
Pcond (Vapor saturado)	1,41	293,00	428,00	1,76
Pev (Vapor saturado)	0,80	285,90		
T° Agua entrada		288,65		
T° Agua salida		294,85		
Flujo de agua (g/s)		36		

Para el R11

Punto	Presión (bar)	Temperatura (K)	Entalpía (kJ/kg)	Entropía (kJ/kgK)
Ambiente	1,02	293,00	235,00	0,81
1 Entrada GV	6,42	289,31	48,18	0,20
2 Salida GV	6,42	270,32	251,62	0,82
2' Entrada Tobera				
3 Entrada Difusor/Salida evaporador	0,60	282,92	227,82	0,82
4 Entrada Condensador	1,37	310,57	242,11	0,82
5 Salida Condensador	1,37	289,17	47,84	0,20
6 Entrada Evaporador	0,60	282,92	47,31	0,20
Pgv (Vapor saturado)	6,42	362,21	452,57	0,81
Pcond (Vapor saturado)	1,37	305,81	424,49	0,81
Pev (Vapor saturado)	0,60	282,92	412,45	0,81
T° Agua entrada		283,65		
T° Agua salida		301,00		
Flujo de agua (g/s)		19.5		

Cabe destacar que el fluido refrigerante entra al evaporador en estado de vapor húmedo para ambos casos, siendo sus títulos para el R245fa y el R-11 de respectivamente.

Para hallar los flujos que circulaban por el generador, evaporador y condensador, así como la relación de flujos el calor absorbido por el evaporador, suministrado por el generador, cedido por el condensador, potencia de la bomba y eficiencia tanto como una máquina frigorífica como una bomba de calor son los siguientes:

1. Flujo que circula en el condensador

$$\dot{m}_{cond} = \frac{\dot{m}_w * c_w * (t_s - t_e) + 1.8 * (t_{cond} - t_{amb}) * 10^{-3}}{h_4 - h_5}$$

2. Flujo que circula en el evaporador

$$\dot{m}_{ev} = \frac{V * I + 1.8 * (t_{amb} - t_{ev}) * 10^{-3}}{h_3 - h_6}$$

3. Flujo que circula en el generador de vapor

$$\dot{m}_{generador} = \dot{m}_{cond} - \dot{m}_{ev}$$

4. Relación de flujos

$$rf = \frac{\dot{m}_{ev}}{\dot{m}_{generador}}$$

5. Calor cedido en el condensador

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{m}_{cond} * (h_4 - h_5)$$

6. Calor absorbido en el evaporador

$$\dot{Q}_{ev} = \dot{m}_{ev} * (h_3 - h_6)$$

7. Calor suministrado en el generador de vapor

$$\dot{Q}_{generador} = \dot{m}_{generador} * (h_2 - h_1)$$

8. Potencia de la bomba

$$\dot{W}_{bomba} = \dot{m}_{generador} * (h_1 - h_5)$$

9. Eficiencia de la máquina frigorífica

$$\varepsilon_{mf} = \frac{\dot{Q}_{ev}}{\dot{Q}_{generador} + \dot{W}_{bomba}}$$

10. Eficiencia de la bomba de calor

$$\varepsilon_{bc} = \frac{\dot{Q}_{cond}}{\dot{Q}_{generador} + \dot{W}_{bomba}}$$

5.3.3 Flujos, Potencias y Eficiencias

Refrigerantes	R245fa	R11
Flujo por el condensador (kg/s)	0,004340903	0,007398249
Flujo por el evaporador (kg/s)	$1,86207 \cdot 10^{-5}$	0,000100546
Flujo por el generador (kg/s)	0,004322283	0,007297703
Relación de flujos	0.004308069	0.013777755
Calor del condensador (kW)	0,941976	1,4372511
Calor del evaporador (kW)	0,00378	0,0181494
Calor del generador de vapor (kW)	0,959546723	1,484675279
Potencia de la bomba (kW)	0,064834238	0,002458596
Eficiencia como máquina frigorífica	0,003690033	0,012204281
Eficiencia como bomba de calor	0,919556333	0,966457105

6. Conclusiones

Como se ha podido observar, las prestaciones del refrigerante sustituto son significativamente menores que la del refrigerante original, no pudiendo alcanzar las presiones y temperaturas que anteriormente se alcanzaba con el original, necesitando de más trabajo de impulsión de la bomba y absorbiendo menos calor en el evaporador, por lo que la eficiencia tanto de máquina frigorífica como de bomba de calor se ven reducidas considerablemente, aparte de que las temperaturas en el evaporador y condensador son más altas, no refrigerando adecuadamente.

También hay que tener en cuenta que el panorama en el mundo de la refrigeración está en constante cambio introduciendo nuevas medidas, basándose principalmente en el aspecto medioambiental, para contribuir a la reparación de la capa de ozono, por ello se están volviendo a emplear refrigerantes que dejaron de usarse, como el caso de amoníaco o el dióxido de carbono, que no tienen impacto sobre la capa de ozono pese a que pueda ser tóxico para las personas.

La mayoría de refrigerantes sujetos a esta nueva normativa se hallan en aplicaciones de la vida cotidiana, como en almacenes de frío, supermercados y

refrigeración industrial por ejemplo, donde la carga de refrigeración son lo suficientemente altas para hallarse bajo las nuevas normas de aplicación.

Algo muy importante a tener en cuenta es que el porcentaje de eliminación de los gases fluorados se considera correcto, ya que en 2018 será difícil encontrar nuevas instalaciones que usen refrigerantes como R134a o R410A, dichos cambios en la normativa contribuyen a una positiva regeneración de la capa de ozono.

Pese a que la máquina actualmente se encuentra en una situación difícil de encontrar un sustituto adecuado que cumpla con las prestaciones, para el ámbito práctico sigue siendo útil ya que permite a los alumnos tener contacto con el mundo de la refrigeración por eyección de vapor. Además, como ya se mencionó, la máquina cuenta con un sistema de acoplamiento a un panel solar, por lo que puede resultar interesante comprobar un estudio de eficiencia cuando se le acopla dicha instalación solar.

7. Referencias

Y. A. Çengel M. A. Boles (2011). *Termodinámica. Séptima edición*. Editorial Mc Graw Hill

P. A. Hilton LTD. (1992) *Manual experimental de operación y mantenimiento bomba de calor/refrigeración a chorro de vapor*.

Fenercom (2013). *Manual de manipulación de gases refrigerantes*.

J. M. Palomar Carnicero F. Cruz Peragon *Apuntes de ingeniería térmica*. Area de máquinas y motores térmicos Universidad de Jaén.

J. M. Palomar Carnicero F. Cruz Peragon *Apuntes de ingeniería térmica II*. Area de máquinas y motores térmicos Universidad de Jaén.

J. M. Palomar Carnicero F. Cruz Peragon *Ingeniería térmica II Manual de trabajos dirigidos*. Area de máquinas y motores térmicos Universidad de Jaén

REGLAMENTO (UE) N o 517/2014 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO (2014)

Ecured conocimiento con todos y para todos. *Protocolo de Montreal*
www.ecured.cu/Protocolo_de_Montreal

Termograf, Simulador ejercicios de termodinámica. *Video-Tutoriales*
<http://termograf.unizar.es/www/index.htm>