



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

Grado en Ingeniería Mecánica

***ANÁLISIS TEÓRICO DE REFRIGERANTES PARA SU
UTILIZACIÓN EN BOMBAS DE CALOR APLICADAS A
PROCESOS INDUSTRIALES***

Autor:

Rodríguez Rodríguez, Diego

Tutor(es):

**Horrillo Güemes, Alfonso Jesús
Máquinas y Motores Térmicos
(MMT)**

Valladolid, Junio de 2025

RESUMEN

Este proyecto nace del interés en desarrollar un sistema generación de calor con bomba de calor, aplicado a nivel industrial, para fomentar el uso de energía eléctrica de origen renovable, reduciendo el consumo de combustibles fósiles.

Se analizará el entorno y su consumo energético para determinar los procesos o aplicaciones que supongan un consumo muy importante de energía y que pueden ser abordados, definiendo los refrigerantes adecuados para su uso, los ciclos de bomba de calor y realizando simulación teórica con el programa COFE-COCO a través de estudios paramétricos se evaluará el comportamiento de los distintos refrigerantes y ciclos.

Concluyendo finalmente la correcta funcionalidad y posible aplicación del sistema planteado.

ABSTRACT

This project arises from the interest in developing a heat generation system with a heat pump, applied at an industrial level, to promote the use of electrical energy of renewable origin, reducing the consumption of fossil fuels.

The environment and its energy consumption will be analyzed to determine the processes or applications that suppose a very important energy consumption and that can be addressed, defining the appropriate refrigerants for their use, the heat pump cycles and performing theoretical simulation with the COFE-COCO program through parametric studies, the behavior of the different refrigerants and cycles will be evaluated.

Finally, concluding the correct functionality and possible application of the proposed system.

Palabras clave / Keywords

Energía, renovable, industrial, refrigerantes, calor, ciclos, simulación

Índice

CAPITULO 1. Motivación y objetivos del trabajo	5
1.1 – Motivación.....	5
1.2. – Objetivos y alcance.....	7
1.3. – Desarrollo del trabajo. Metodología.....	9
1.4. – Ámbito de las energías renovables	10
CAPITULO 2. Procesos industriales con suministro de calor mediante bombas de calor.....	14
2.1. – Niveles térmicos industriales objetivo	14
2.2. – Sectores y procesos industriales abordados.	15
2.3. – Fluidos refrigerantes adecuados	19
2.3.1 - Características deseables de los refrigerantes industriales	21
2.4. – Componentes de la instalación	31
2.4.1.- Componentes de alta temperatura	35
CAPITULO 3. Modelos de ciclos de bomba de calor con herramienta COCO	37
3.1. – Ciclos frigoríficos utilizados	37
3.1.1 - Ciclo simple.....	38
3.1.2 - Ciclo compuesto	41
3.1.3 - Ciclo en cascada.....	43
3.2. – Modelado de los ciclos en COCO.....	44
3.3.1 – Implementación de ciclos y simulación	46
3.2. – Resultados esperados de la simulación	56
CAPITULO 4. Resultados COCO.....	57
4.0. – Hipótesis, asunciones y justificaciones	57
4.1. – Estudios paramétricos, optimización	57
4.1.1. – Ciclo simple.....	57
4.1.2. – Ciclo compuesto	70
4.1.3. – Ciclo en cascada	83
4.2. – Comparativa y análisis de resultados	88
4.2.1. – Ciclo simple.....	89
4.2.2. – Ciclo compuesto	96



4.2.3. – Ciclo en cascada	103
CAPITULO 5. Conclusiones y trabajos futuros	105
Bibliografía	108
ANEXOS	111
Índice de ilustraciones	111
Diagramas de Mollier de refrigerantes	116

CAPITULO 1. Motivación y objetivos del trabajo^{1 2 3}

1.1 – Motivación

Este trabajo se basa en desarrollar un método para aumentar el aprovechamiento de las energías renovables y así reducir el impacto medioambiental que producen ciertos procesos industriales, implementando el uso de ciclos con bomba de calor en procesos que demanden calor a media y baja temperatura. Siendo electricidad el único consumo energético en este sistema, pudiendo llegar a obtener un rendimiento muy alto. De este modo, se conseguiría llegar a sustituir los sistemas convencionales, o al menos reducir el consumo de los combustibles fósiles utilizados como el carbón, el gas natural por energías renovables y limpias. Reduciendo notablemente las emisiones y el impacto ambiental, fomentando el aprovechamiento y el interés de este tipo de energías de cara al futuro. Para desarrollar este trabajo será necesario realizar un estudio teórico, utilizando herramientas de simulación, para así poder justificar la necesidad real que existe actualmente en cuanto a la reducción de las emisiones y fomentando de uso de las energías renovables, suponiendo además un importante ahorro económico.

A continuación, se muestra un diagrama de Sankey donde se recoge el balance energético en España del año 2023. La industria supone un consumo energético de 23.591 ktep, de esta cantidad la mayoría es aportada por gas natural (aproximadamente 7000 ktep), y tan solo una mínima parte por energías renovables.

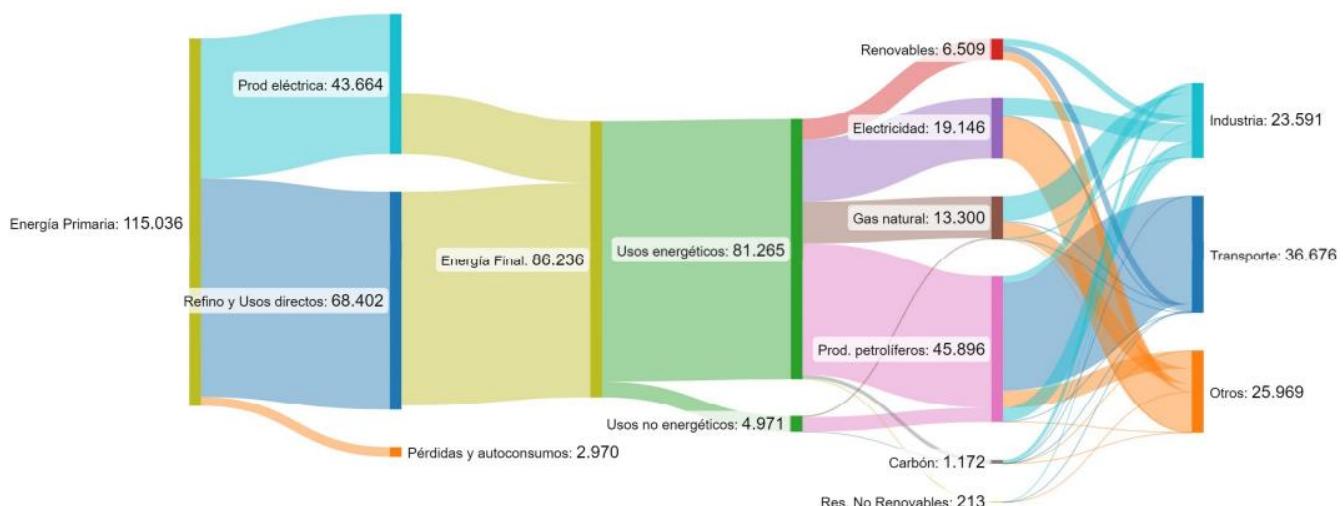


Ilustración 1. Diagrama Sankey de la energía en España 2023. Unidades ktep.
(Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, 2023)

¹ (Statista, 2023)

² (Rodríguez, 2023)

³ (Renovables, 2023)

Haciendo un análisis del consumo energético final, sustituir ese aporte energético del gas natural por energías renovables supondría un potencial ahorro energético y fomentaría la descarbonización progresiva de los procesos industriales.

En la siguiente ilustración se determinan los sectores dentro de la industria donde reside el potencial de aplicación de este proyecto, pudiendo determinar justificadamente los sectores clave para seleccionar los procesos de potencial interés.

**Distribución porcentual del consumo energético en la industria, por ramas de actividad.
Año 2021**



Ilustración 2. Distribución del consumo energético en la industria por ramas de actividad, 2021.
(Instituto nacional de estadística , 2021)

Podemos clasificar los principales consumidores en:

1. Sector industria metalúrgica.

En cabeza, con un consumo estimado del 18,8% de la energía consumida en la industria.

2. Sector industria alimentaria.

En segundo lugar, está la industria alimentaria, con un consumo estimado del 15,3% de la energía consumida en la industria.

3. Sector industria química.

En tercer lugar, el sector de la industria química con un consumo estimado del 14,5% de la energía consumida en la industria.

Como se puede ver, los órdenes de magnitud de estos consumos son muy elevados y suponen un volumen de consumo muy importante a nivel nacional.

De este análisis nace la principal motivación de este proyecto, la cuál será tratar de hacer posible la metodología para conseguir reducir este consumo, con el gran ahorro que supone, tanto a nivel energético como económico. Buscando un mayor aprovechamiento de energía eléctrica, en especial la proveniente de renovables, y reduciendo el consumo de combustibles fósiles. Esto supone además una gran reducción de las emisiones contaminantes, un aspecto para tener en cuenta muy importante para conseguir un futuro sostenible.

Con el análisis de aplicación de este proyecto en la industria, se demuestra la importancia de cambiar la fuente de energía de determinados procesos industriales, principalmente los que mayores consumos suponen, analizando el ahorro energético que supone y con la reducción de las emisiones contaminantes consecuentes.

1.2. – Objetivos y alcance

El alcance de este proyecto se define como estudio teórico del comportamiento de refrigerantes, evaluando diferentes ciclos, a través de simulación teórica con software COFE-COCO, analizando los resultados obtenidos y concluyendo la viabilidad de aplicación en cuanto a posibilidad de abordar los procesos definidos.

Se definen los siguientes objetivos, el éxito de cada uno de ellos definirá el éxito de este estudio. Se pretende demostrar la posibilidad de conseguir la electrificación de algunos procesos industriales fomentando descarbonización industrial. Los objetivos que se persiguen en este proyecto son los siguientes.

- 1. Análisis del nivel térmico de los procesos.** Para poder definir los límites del este estudio, primero hay que establecer el nivel térmico que se puede alcanzar con los ciclos y refrigerantes utilizados, de modo que se puedan

determinar los sectores, así como los procesos industriales de interés a los que se puede aplicar este proyecto.

2. **Búsqueda de refrigerantes.** Es imprescindible encontrar y conocer los distintos refrigerantes existentes en el mercado para su aplicación y sobre todo analizar si son aptos para su uso según las normativas vigentes, que se encargan de garantizar la seguridad de las personas y el medio ambiente. Una vez seleccionados los refrigerantes aptos, analizar sus características físicas y propiedades termodinámicas para calificar su aptitud ya de cara a su uso en el proceso térmico con bomba de calor de modo que se puedan elegir los seis refrigerantes más adecuados para su uso.
3. **Ciclos térmicos con bomba de calor.** Para poder implementar los ciclos térmicos, primero hay que determinar que ciclos térmicos son más adecuados para su implementación, así como analizar sus componentes y características principales para evaluar su aptitud en su implementación para después simularlos mediante el programa COFE-COCO.
4. **Estudios paramétricos.** Para poder evaluar con precisión y exactitud el comportamiento de los distintos refrigerantes en los distintos procesos, se va a utilizar la herramienta COFE-COCO, es una software de simulación que nos va a permitir construir los ciclos térmicos con bomba de calor y experimentar con los distintos refrigerantes que dispone en su base de datos, los cuales tienen bien establecidas sus propiedades. Con esta experimentación podremos establecer las condiciones de trabajo en el proceso, presión y temperatura en los distintos componentes, así como el consumo energético, el nivel térmico alcanzado y el COP, evaluando el rendimiento del ciclo para cada refrigerante y condiciones establecidas, el objetivo será realizar estudios paramétricos de optimización para maximizar el rendimiento de cada ciclo con cada refrigerante.
5. **Ánalisis de la viabilidad futura del proyecto.** Es importante hacer un análisis de los elementos principales de la instalación térmica, pues las condiciones de trabajo son distintas de las convencionales, temperaturas y presiones más elevadas, por lo que es importante pensar en el desarrollo de nuevos elementos, bombas de calor, intercambiadores, compresores, etc. En definitiva, analizar los requisitos que deben de cumplir, en base a las condiciones de trabajo para hacer posible su dimensionado.

Esta serie de objetivos o hitos son indispensables para poder abordar el estudio teórico que se plantea, por lo que se debe conseguir el éxito en cada uno de ellos.

1.3. – Desarrollo del trabajo. Metodología

Estructura del trabajo

La estructura de este trabajo se desarrolla a lo largo de una serie de capítulos donde en cada uno de ellos se abordan una serie de puntos o temas que es necesario tratar para poder avanzar en el desarrollo de este. De manera resumida en cada capítulo se aborda lo siguiente.

En el capítulo 1, se estudiará el entorno y el consumo energético por sectores a nivel industrial, después se definen los objetivos del proyecto y la metodología o estructura seguida en el desarrollo del trabajo.

En el capítulo 2, se estudiarán los distintos procesos industriales de mayor relevancia en cuanto a consumo energético definiendo además el nivel térmico de los procesos que se marcan como objetivo de aplicación, se estudiarán los refrigerantes que se adecuados para su uso, atendiendo a las características más relevantes de cada uno de ellos para su aplicación en bomba de calor, por último se analizan los principales componentes de la instalación y su función dentro de la misma.

En el capítulo 3, se establecen los ciclos de interés con bomba de calor para su posterior modelado y simulación, analizando sus características y componentes. Por último se muestran los modelos dimensionados en el programa de simulación teórica COFE-COCO los diferentes ciclos escogidos.

En el capítulo 4 se justifican las hipótesis, asunciones y simplificaciones de las simulaciones, después se recopilan todos los resultados obtenidos en dichas simulaciones, para cada refrigerante y ciclo, y por último, se realiza una comparativa de los resultados obtenidos.

En el capítulo 5, último capítulo, se reflexiona acerca de las conclusiones del proyecto y el cumplimiento de los objetivos, y se habla acerca de los posibles trabajos futuros en relación con este proyecto.

Tras haber definido los capítulos con los que se desarrolla este trabajo, lo siguiente es definir la metodología seguida en cuanto al desarrollo del contenido. Se ha optado por distribuir el contenido en una serie de fases, marcadas por los acontecimientos o hitos que se obtienen durante el desarrollo del trabajo.

Metodología del trabajo

FASE 1. Estudio del entorno, refrigerantes y procesos. (Capítulos 1 y 2)

En primer lugar se realizará un análisis del consumo energético a nivel global. Destacando los procesos industriales en los que se quiere integrar el proceso. Para después poder analizar más en detalle los distintos procesos industriales, clasificándolos en función de su nivel térmico.

Lo siguiente será analizar en detalle los refrigerantes más adecuados, atendiendo a sus características. Teniendo en cuenta que estén permitidos por normativa tanto actualmente como de cara al futuro.

FASE 2. Estudio ciclos de refrigeración y simulación. (Capítulo 3)

Una vez analizados los refrigerantes con los que se va a realizar los estudios paramétricos, se profundiza en analizar los distintos ciclos que se pueden construir y modelizar para simular. Despues se plantearán los diferentes modelos para realizar los estudios teóricos a través de simulación con COCO. Con los cuales se trabajará para realizar distintos estudios paramétricos, modificando distintas variables y analizando su influencia en los resultados. De manera que se consiga maximizar su eficiencia, además de poder analizar las capacidades de cada ciclo y refrigerante. Tanto a nivel térmico, como calor cedido, consumo energético, etc.

FASE 3. Análisis de los resultados obtenidos. (Capítulo 4)

En el penúltimo capítulo se analizarán los resultados obtenidos y en base a los mismos, se escogerá la configuración idónea para su aplicación real.

FASE 4. Comparativa, conclusiones y trabajos futuros. (Capítulo 5)

Para finalizar, en el último capítulo se realizarán las conclusiones sobre el cumplimiento de los objetivos establecidos para el proyecto así como un planteamiento de cara al futuro para la posible aplicación del proyecto a la industria, con prototipos y una instalación real a escala.

Esta distribución por fases se ha realizado de manera orientativa hacia el seguimiento del desarrollo del proyecto, relacionando cada fase con los capítulos que engloba.

1.4. – Ámbito de las energías renovables

Actualmente el interés de las energías renovables está creciendo de manera exponencial. Cada vez aumenta más la cantidad de energía producida debido al número creciente de instalaciones fotovoltaicas, eólicas, hidroeléctricas, hidrógeno verde, entre otras. Por lo que es muy interesante desarrollar medios y procesos para aumentar el aprovechamiento de esta energía, y así se consiga sustituir a los combustibles convencionales, o por lo menos ir reduciendo su consumo paulatinamente. Pues además de encontrarse en cantidad limitada en el ámbito terrestre, producen emisiones contaminantes que degradan nuestro planeta.

A continuación, se muestra una visión general de algunas tendencias y desarrollos de las energías renovables más destacados actualmente para la producción de energía eléctrica.

- **Energía Solar.**
 - **Eficiencia Mejorada:** Se desarrollan constantemente tecnologías con objeto de mejorar la eficiencia de las células solares, algunos ejemplos son las células solares de película delgada, células solares de perovskita o las células solares tándem.
 - **Almacenamiento de Energía Solar:** Es muy importante buscar métodos y soluciones para poder almacenar la energía solar a gran escala, y dar capacidad para su aprovechamiento en distintos lugares y/o momentos, las investigaciones se centran en desarrollar sistemas de baterías avanzados y tecnologías de almacenamiento térmico.
- **Energía Eólica.**
 - **Nuevas turbinas eólicas:** actualmente se están desarrollando turbinas eólicas de mayor tamaño y altura para exponerse a vientos más fuertes y constantes para mejorar la eficiencia de la generación eólica.
 - **Integración de Energía Eólica Marina:** La energía eólica marina cada vez tiene mayor interés, con parques eólicos ubicados en aguas profundas para aprovechar la energía eólica en alta mar donde los vientos son más fuertes y consistentes.
- **Energía Hidroeléctrica.**
 - **Turbinas Hidroeléctricas mejoradas:** Actualmente se siguen desarrollando turbinas hidroeléctricas más eficientes con el objetivo de reducir el impacto medioambiental y aprovechar la energía del agua de una manera sostenible.
- **Bioenergía.**
 - **Biocombustibles avanzados:** Se sigue investigando y desarrollando mejoras en biocombustibles avanzados como el biogás, el bioetanol de segunda y tercera generación o biocombustibles derivados de algas, combustibles alternativos con un menor impacto medioambiental.

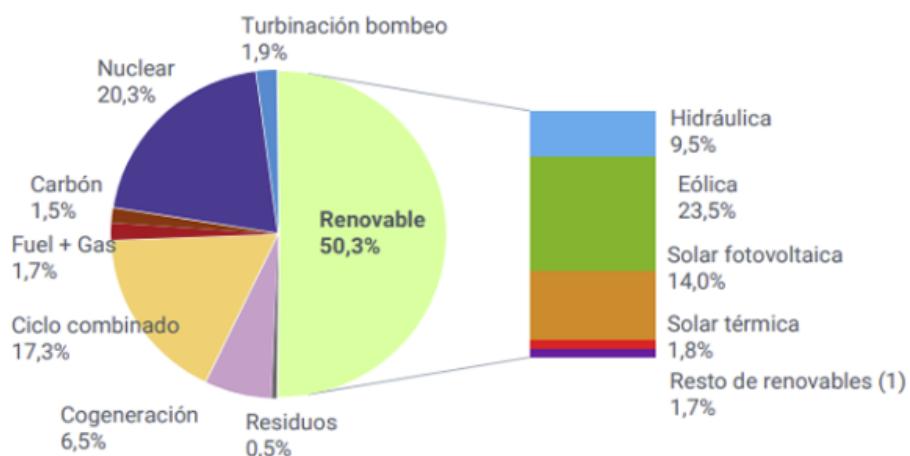
Estos son algunos ejemplos de los avances actuales en energías renovables, lo que demuestra el potencial y el gran interés que estos presentan de cara al futuro, haciendo posible determinados aspectos que antes eran inalcanzables, hoy son posibles y se siguen desarrollando baterías avanzadas con investigaciones continuas para aumentar su eficiencia y que sean más económicas y sostenibles para el almacenamiento de energía a gran escala, de manera que podría conseguirse almacenar energía para por ejemplo, almacenarla cuando esta es más barata y utilizarla cuando sube su precio.

También han surgido los sistemas de energía híbrida, que son aquellos que explotan energía de dos o más fuentes de origen renovable en un mismo punto de conexión. Algunos ejemplos son la energía solar y eólica para crear sistemas más estables y fiables.

El interés de todo esto es poder justificar la necesidad de implementación de nuevas tecnologías para el aprovechamiento de este tipo de energías renovables, y más a nivel industrial, pues como se ha visto el consumo energético de los diversos sectores industriales es muy elevado y el impacto que esto tiene sobre el medioambiente es destacable, ya que en un futuro será imprescindible y de manera obligada usar exclusivamente energías de origen renovable. Muchos gobiernos están estableciendo objetivos demasiado ambiciosos para fomentar el uso de las energías renovables como parte de la lucha contra el cambio climático.

Solo en España, según el Informe Anual de Autoconsumo Fotovoltaico de la Asociación de Empresas de Energías Renovables (Renovables, 2023), la inversión realizada en autoconsumo durante el año 2022 ascendió a 3.065 millones de euros (1.707 millones de euros en inversión de particulares para instalaciones residenciales y 1.358 millones en instalaciones industriales). Se destaca la existencia de mucha dispersión en los datos analizados pues los datos varían desde pequeñas instalaciones de 15 kW a varios MW. Centrándonos en el caso de las instalaciones industriales, la potencia media de cada instalación fue de 70 kW y una inversión media de 58.807 euros por instalación.

Estructura de generación de energía eléctrica (%)



(1) Incluye biogás, biomasa, geotérmica, hidráulica marina, hidroeléctrica y residuos renovables.

En 2023 la energía renovable ha superado el 50% de generación anual por primera vez en la historia.

Ilustración 3. Estructura generación eléctrica en España, año 2023. (SMARTGRIDSINFO.es, 2024)

Con esta gráfica se muestra la creciente evolución de las renovables como fuente de generación de energía eléctrica, que por primera vez en la historia superó el 50% de toda la energía generada, en el año 2023. Se puede destacar que la eólica y la solar fotovoltaica encabezan la generación con un 23,5% y un 14% de la generación mediante renovables respectivamente.

Durante el 2024 la generación eléctrica por renovables aumento al 66% del total, con la eólica y solar fotovoltaica en cabeza, 24,9% y 25,1% respectivamente. Esto demuestra el interés y evolución crecientes en la generación eléctricas a partir de las energías renovables.

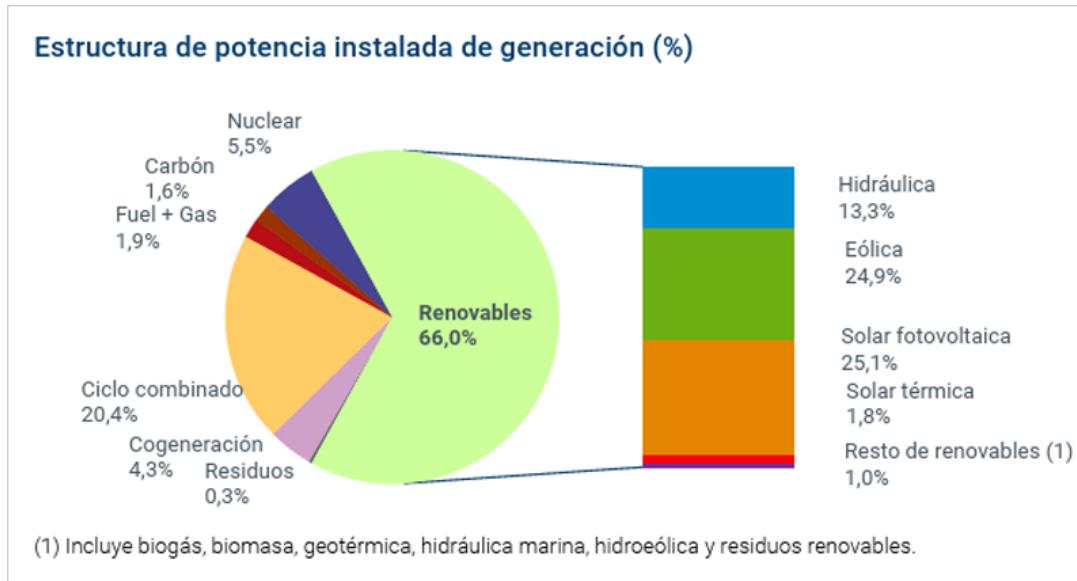


Ilustración 4. Estructura generación eléctrica en España, año 2024. (SMARTGRIDSINFO.es, 2024)

CAPITULO 2. Procesos industriales con suministro de calor mediante bombas de calor

2.1. – Niveles térmicos industriales objetivo ⁴

Para poder marcar los límites de este estudio, el siguiente paso es establecer el nivel térmico que podemos alcanzar, teniendo en cuenta los refrigerantes actuales y los componentes del ciclo frigorífico, pues estos limitan las temperaturas alcanzables y por ende los procesos que podemos abordar.

Este trabajo se desarrolla para procesos con un nivel térmico de baja temperatura (<150°C) Temperaturas que son posibles de alcanzar con la tecnología y los refrigerantes actuales.

Analizando la demanda a nivel global, los principales sectores consumidores con el industrial y el del transporte.

GRAN DEMANDA DE CALOR EN LA INDUSTRIA A NIVEL GLOBAL

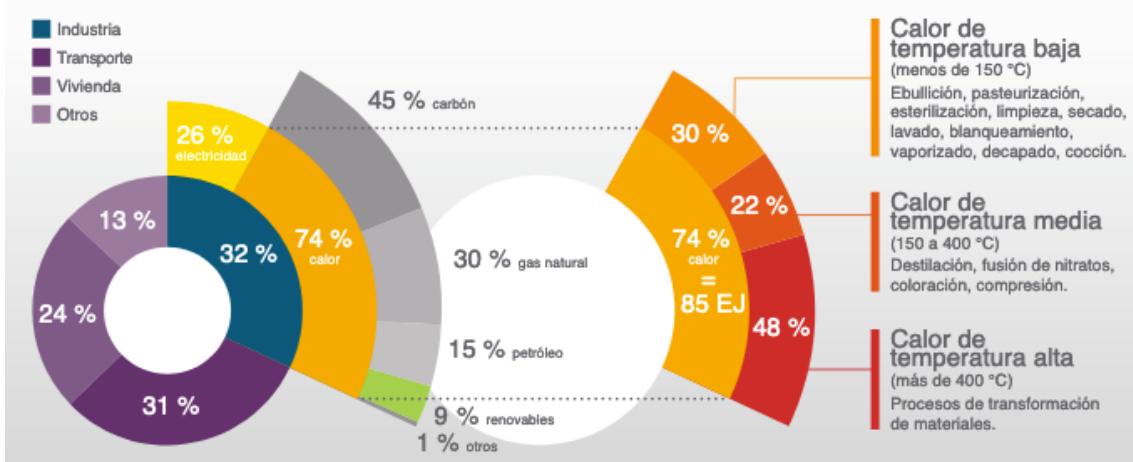


Ilustración 5. Demanda industrial de calor a nivel global. (Energías Renovables, 2023)

El sector industrial es el principal sector de interés para este trabajo pues ocupa el 32% del consumo energético a nivel global, en el que el 74% de consumo es calor, el restante 26% consumo eléctrico, por lo que implementar este proyecto a nivel industrial supone un gran avance.

La cantidad de energía consumida destinada al sector industrial supone un porcentaje muy elevado, dentro de la cual $\frac{3}{4}$ partes se consume finalmente en forma

⁴ (Renovables, 2023)

de calor, siendo generar ese calor usando energías renovables el principal objetivo de este trabajo.

Conseguir utilizar energías renovables para conseguir el calor requerido en los diferentes procesos supondría un ahorro muy elevado, tanto a nivel económico como a nivel medioambiental atendiendo a la elevada cantidad de energía demandada por estos sectores.

Si se desglosa el 74% de calor consumido, el 30% es calor a temperatura baja ($<150^{\circ}\text{C}$), el 22% es calor a media temperatura (de 150°C a 400°C) y el restante 48% es calor a alta temperatura ($>400^{\circ}\text{C}$).

Solo el nivel térmico de baja temperatura supone el 32% de calor consumido a nivel industrial, por lo que hablamos de un nivel energético muy grande. Estos procesos de baja temperatura engloban a nivel industrial una gran parte los procesos de los sectores alimentario y químico, quedando excluido el sector metalúrgico que requiere temperaturas no alcanzables actualmente; Ejemplos de estos procesos podrían ser para baja temperatura procesos como pasteurización, ebullición, esterilización, limpieza, secado, lavado, vaporizado, cocción, destilación, compresión.

El modo de abordar este trabajo consiste en lo siguiente. Teniendo un nivel térmico objetivo definido, se estudian los diferentes refrigerantes permitidos para uso industrial de cara al futuro, ver los diferentes tipos de ciclos frigoríficos que se podrían utilizar y realizar un estudio experimental mediante el programa de simulación COFE COCO (cape-open to cape-open), con el que podremos experimentar diferentes refrigerantes en diferentes ciclos y recopilar resultados para elaborar.

2.2. – Sectores y procesos industriales abordados. ^{5 6}

Como bien se ha explicado antes, se abordan todos los procesos incluidos en el nivel térmico de baja temperatura, es decir, toda aplicación con temperaturas de hasta 150°C . Y algunos procesos de media temperatura, aquellos que requieran como máximo 240°C , que es el máximo nivel térmico que se puede abordar.

Los procesos de baja temperatura son principalmente aquellos dentro del campo de la industria alimentaria, pues la mayoría de las actividades están por debajo de 150°C , algunos ejemplos de las actividades que mayor cantidad de energía consumen anualmente en los que se podría aplicar este proyecto son:

⁵ (Exchangers, HSR Heat, 2025)

⁶ (Mundolatas.com, 2023)

- **Pasteurización.**

Este proceso consiste en la destrucción, mediante calor, de todos los microorganismos patógenos que están en los lácteos y que podrían provocar enfermedades o aumentar la acidez del producto.

La temperatura del proceso supera los 100°C, para conseguir esta energía térmica se utilizan calderas, podría ser objeto de sustitución por bomba de calor y así reducir emisiones e incluso garantizar un ahorro económico. La siguiente imagen muestra un esquema simplificado de cómo se llevaría a cabo el proceso

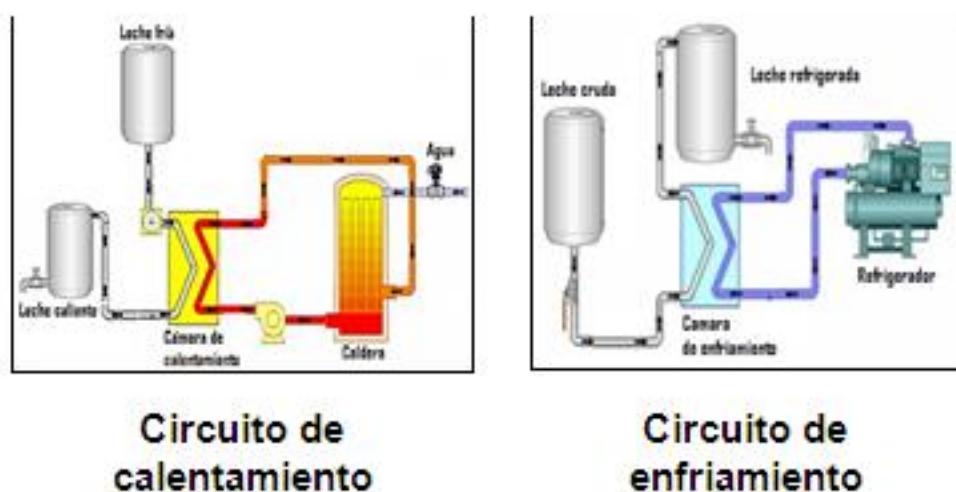


Ilustración 6. Pasteurización de la leche. "monografías". (Exchangers, HSR Heat, 2025)

Es importante destacar esta aplicación ya que es indispensable en el tratamiento del alimento lácteo, por lo que supone un gran consumo energético.

- **Esterilización.**

La esterilización es otra de las principales aplicaciones en el sector alimenticio, zumos, conservas y todo tipo de alimentos. Su nivel térmico es superior, pero cercano a los 100 °C, en torno a 116/130°C, por lo que se encuentra dentro de nuestras posibilidades. En este proceso se utiliza principalmente vapor de agua, por lo que implementar la utilización de bomba de calor supondría el ahorrar la necesidad de la instalación para obtener ese vapor, facilitando en muchos casos la instalación requerida para este proceso.

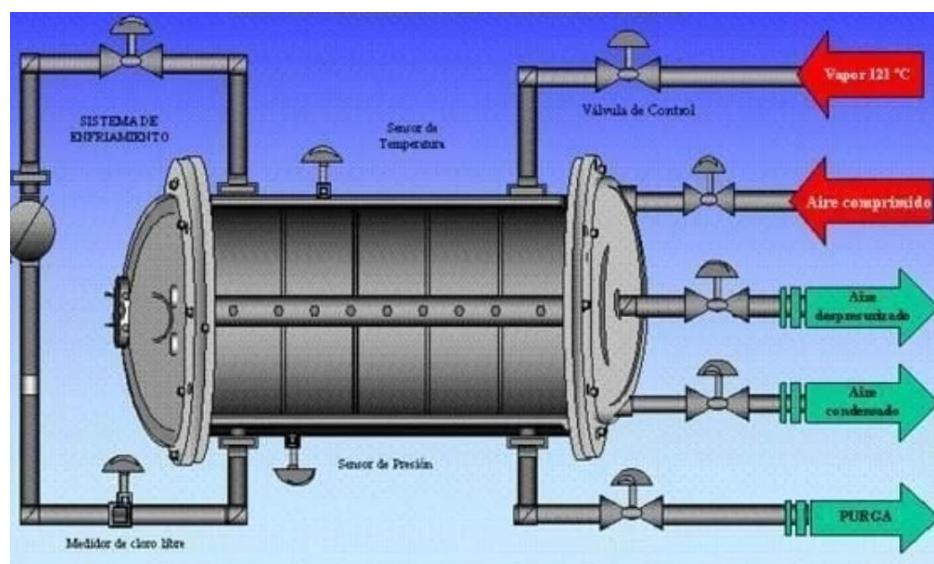


Ilustración 7. Esterilización industria conservera. (Mundolatas.com, 2023)

Estos dos son los dos procesos más importantes, de cara al consumo energético en baja temperatura dentro de la industria alimentaria. También podría aplicarse a procesos más sencillos de la industria alimentaria como cocciones, fermentaciones, calentamientos. Por ejemplo en industria química, control térmico de reacciones, etc. En definitiva, se pueden abordar una gran cantidad de procesos.

Aplicar esta idea a este tipo de procesos, supondría un ahorro muy destacable, además de suprimir la utilización de combustibles convencionales para llevarlas a cabo, ya que no sería necesario usar caldera. Además, el único consumo energético sería el consumo del compresor por lo que aprovechando el aumento de las energías renovables se llevarían a cabo de manera más sostenible.

En cuanto a los procesos térmicos de media temperatura, hasta 250°C. A continuación se muestran procesos industriales habituales:

- **Industria alimentaria. (Otros procesos)**
 - Panadería y repostería: 180-250 °C
 - Cocción de carnes: 120-250 °C
 - Deshidratación de frutas y verduras: 50-80 °C
 - Pasteurización de productos envasados: 60-90 °C
- **Industria química.⁷**

⁷ (Hauser, 2023)

- Destilación fraccionada.⁸
Temperatura entre 100 y 250 °C. Aplicado a la separación de mezclas en estado líquido. Muy utilizado en la obtención de productos químicos como disolventes, derivados de petróleo ligero, etc.

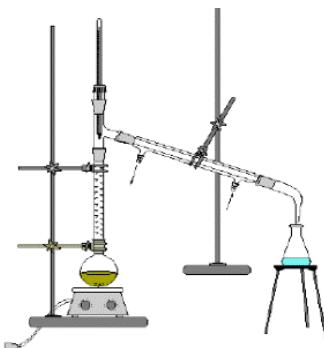


Ilustración 8. Destilación fraccionada.
(Fernández, 2024)

- **Secado y deshidratación.**⁹

Temperatura entre 50 y 200 °C. Aplicado a la eliminación de humedad en productos como por ejemplo, fertilizantes, polímeros, sustancias químicas, etc.

- **Reacciones químicas endotérmicas.**

Temperatura hasta 250 °C. Procesos de síntesis de sustancias químicas. Por ejemplo para la producción de resinas, productos farmacéuticos, diversos compuestos químicos, etc.

- **Evaporación y concentración de soluciones.** Temperaturas de hasta 150 °C. Procesos para la producción de concentrados. Por ejemplo, fabricación de jarabes, extracción de sustancias en industria farmacéutica, etc.

Dejando fuera todos los procesos de más de 250 °C, por lo que quedan fuera la industria cerámica y metalúrgica, pues sus procesos superan los 600 °C. Mientras que se pueden abordar la casi totalidad de los procesos de industria alimentaria y gran parte de los procesos de la industria química, así como otros sectores que supongan un menor nivel térmico al definido. Esto ya supone abordar una gran parte de los procesos industriales con consumo de calor, y se puede ver el alcance de este proyecto.

⁸ (Fernández, 2024)

⁹ (Galiano, s.f.)

2.3. – Fluidos refrigerantes adecuados ^{10 11 12}

Un fluido refrigerante es aquel que cambia de fase tanto en el condensador como en el evaporador, intercambiando energía con el entorno, esta energía es aprovechada para diversas aplicaciones, la más extendida refrigeración.

Las principales **propiedades** que hay que tener en cuenta a la hora de elegir un refrigerante podemos resumirlas en tres:

1. **Termodinámicas:** Características térmicas del refrigerante.
2. **Químicas:** Estabilidad, comportamiento junto a otros materiales.
3. **Seguridad:** No inflamables, no toxicas.

A nivel industrial, se pueden destacar los siguientes refrigerantes entre los más utilizados:

- **Hidroclorofluorocarbonos (HCFC):** Aunque están siendo gradualmente eliminados debido a su impacto en la capa de ozono, algunos sistemas más antiguos todavía pueden utilizar HCFC, como el R-22.
- **Hidrofluorocarbonos (HFC):** Estos son los sucesores de los CFC y HCFC, ya que no contienen cloro y por eso no dañan la capa de ozono. (“Refrigerantes y cambio climático: Impacto en la capa de ozono”) Algunos refrigerantes HFC comunes son el R-134a, R-410A y R-404A.
- **Naturales**
 - **Amoniaco (NH₃ o R-717):** Ammonia es un refrigerante natural que no tiene impacto directo en el agotamiento del ozono ni contribuye significativamente al calentamiento global. Es eficiente y ha sido utilizado en sistemas de refrigeración industrial durante muchos años.
 - **Dióxido de carbono (CO₂ o R-744):** El CO₂ es otro refrigerante natural que ha ganado popularidad debido a su bajo impacto ambiental. Se utiliza especialmente en sistemas de refrigeración y bombas de calor.
 - **Agua (R-718):** Natural, abundante, tiene una alta entalpia de cambio de fase y un alto punto crítico, además su impacto ambiental es nulo.

¹⁰ (Keri-Marie A., 2022)

¹¹ (Arnabat, 2019)

¹² (Climalife, 2024)

- **Hidrocarburos (HC):** Refrigerantes como el propano (R-290) y el isobutano (R-600a) son hidrocarburos inflamables que han sido utilizados en sistemas de refrigeración domésticos y comerciales.

La siguiente tabla recoge las principales características de algunos refrigerantes de especial interés, como la presión y temperatura críticas, grado de influencia en la destrucción de la capa de ozono (ODP), potencial del calentamiento global (GWP) así como el grupo de seguridad en el que están incluidos (Safety group), que indica la inflamabilidad de estos.

Tabla 1. Tabla refrigerantes de interés en alta temperatura. (Keri-Marie A., 2022)

Table 2

Properties of potential high-temperature refrigerant fluids (included in REFPROP [67]).

Refrigerant	Type	P _{crit} (kPa)	T _{crit} (°C)	GWP	ODP	Safety group
R1224ydl(Z)	HCFO	3337	155.5	1	minimal	A1
R1233zd(E)	HCFO	3624	166.5	1	minimal	A1
R1234-yf	HFO	3382	94.7	<1	0	A1
R1234ze(E)	HFO	3635	109.4	6	0	A2L
R1234ze(Z)	HFO	3531	150.1	<1	0	A2L
R1243zf	HFO	3518	103.8	<1	0	A2
R1336mzz (Z)	HFO	2903	171.4	2	0	A1
Ammonia	Natural	11,363	132.4	0	0	B2L
CO ₂	Natural	7377.3	31.0	1	0	A1
Water	Natural	22,064	374.0	0	0	A1
Propane	Natural	4251.2	96.7	3	0	A3
Isobutane	Natural	3629	134.7	4	0	A3
Butane	Natural	3796	152.0	4	0	A3
Isopentane	Natural	3378	187.2	5	0	A3
Pentane	Natural	3368	196.6	5	0	A3
R245fa	HFC	3651	153.9	1030	0	B1
R365mfc	HFC	3266	186.9	794	0	A2
R410a	HFC	5782	78.1	675	0	A1
R134a	HFC	4059.2	101.1	1430	0	A1
R227ea	HFC	2925	101.8	3220	0	A1

Una primera clasificación en cuanto a interés por ciertos refrigerantes es en base a su punto crítico, pues interesan los refrigerantes con un punto crítico elevado de modo que se pueda trabajar en el nivel térmico requerido.

Entonces una característica importante a tener en cuenta a la hora de seleccionar refrigerantes es el punto crítico, es decir, una alta temperatura crítica. Interesan aquellos que permiten su uso en procesos de mayor temperatura, extendiendo el campo de aplicación de este proyecto a un número mayor de procesos.

En base a la tabla anterior y su clasificación se pueden destacar los siguientes grupos:

- **Grupo HCFO:**
 - R1233zd. ($T_c: 166,5^\circ\text{C}$ y $P_c: 36,24\text{bar}$)
- **Grupo HFO:**
 - R1336mzz. ($T_c: 171,4^\circ\text{C}$ y $P_c: 29,03\text{bar}$)
- **Grupo NATURALES:**
 - Amoniaco (R717). ($T_c: 132,4^\circ\text{C}$ y $P_c: 113,63\text{ bar}$)
 - Agua (R718). ($T_c: 374^\circ\text{C}$ y $P_c: 220,64\text{ bar}$)
 - Propano (R290). ($T_c: 96,7^\circ\text{C}$ y $P_c: 42,51\text{bar}$)
 - Isopentano (R601a). ($T_c: 187,2^\circ\text{C}$ y $P_c: 33,78\text{ bar}$)
 - Pentano (R601). ($T_c: 196,6^\circ\text{C}$ y $P_{cri.}: 33,68\text{ bar}$)
 - CO₂ (R744). ($T_c: 31^\circ\text{C}$ y $P_c: 73,77\text{ bar}$)
- **HFC:**
 - R365mfc. ($T_c: 186,9^\circ\text{C}$ y $P_c: 32,66\text{bar}$)

Esta clasificación es en función del grupo de refrigerantes al que pertenecen y se va a realizar un estudio de los refrigerantes escogidos para ver sus propiedades físicas, sus características en cuanto a seguridad, determinando características como el límite de inflamabilidad o grupo de seguridad en el que se incluyen, así como su influencia en el medioambiente y ver cómo es su comportamiento en ciclos frigoríficos.

Para cada refrigerante se recogen las propiedades de especial interés para su comportamiento en el ciclo térmico y así determinar si son adecuados para su implementación y ver si se puede conseguir el nivel térmico requerido, tras este estudio se realizará un estudio experimental con COFE-COCO para ver el trabajo que obtendríamos en los ciclos con cada uno de los refrigerantes.

2.3.1 - Características deseables de los refrigerantes industriales ¹³

A continuación, se describen las características más relevantes a las que se han atendido a la hora de seleccionar los refrigerantes de modo que su uso sea apto y seguro tanto para los usuarios como para el medioambiente, además de ser adecuado para su aplicación en los procesos industriales que se requiere su electrificación en base a las características más relevantes que hacen adecuado su uso.

¹³ (Climalife, 2024)

2.3.1.1 - *Impacto medioambiental*

Para poder establecer que refrigerantes se podrán utilizar en un futuro, hay que considerar el impacto medioambiental que tienen, para ello Uno de los ejemplos más conocidos dedicados a la protección de la capa de ozono es el protocolo de Montreal, un tratado internacional diseñado para proteger la capa de ozono mediante la reducción del uso de sustancias agotadoras de ozono, como los clorofluorocarbonos (CFC) y los hidroclorofluorocarbonos (HCFC). Entonces pudiera ser fuente de información de los refrigerantes permitidos para uso industrial de cara a la actualidad y al futuro.

Atendiendo a estas restricciones se van a estudiar los refrigerantes que tienen un grado de destrucción de la capa de ozono mínimo o nulo y que no influyen en el calentamiento global, de esta manera estaremos contribuyendo a reducir el impacto medioambiental y aseguraremos que el uso de estos refrigerantes escogidos estará permitido.

2.3.1.2. - *Grado de seguridad de los refrigerantes* ¹⁴

En este subapartado se estudia la clasificación de los refrigerantes acorde a su grado de seguridad, tanto con relación a la toxicidad como a su peligrosidad debido a su grado de inflamabilidad. El grado de seguridad en cuanto a toxicidad e inflamabilidad se rige por la norma ISO-817/ASHRAE 34, y clasifica a los refrigerantes según los siguientes criterios:

- **Clasificación en función de la toxicidad**
 - **Categoría A:** Refrigerantes que no tienen efectos adversos para la mayoría de los que se exponen al refrigerante durante una jornada laboral de 8 horas diarias (40 horas semanales), cuya concentración media en el tiempo es igual o superior a una concentración media de 400 ppm. (V/V) o 400 ml/m³.
 - **Categoría B:** Refrigerantes que no tienen efectos adversos para la mayoría de los que se exponen al refrigerante durante una jornada laboral de 8 horas diarias (40 horas semanales), cuya concentración media en el tiempo es inferior a una concentración media de 400 ml/m³ o 400 ppm. (V/V).

¹⁴ (Didascalia, 2019)

- **Clasificación en función de la inflamabilidad**
 - **Categoría 1:** Refrigerantes que no muestran propagación de llama cuando se ensayan a 60 °C y 1,013 bar.
 - **Categoría 2:** Muestran propagación de llama cuando se ensayan a +60°C y 1,013 bar, límite inferior de inflamabilidad (mezcla con aire) igual o superior al 3,5% en volumen (V/V) y un calor de combustión menor que 19.000 kJ/kg.
 - **Categoría 2L:** Entra dentro de la categoría 2, se añade la condición de que los refrigerantes dentro del grupo 2L tienen una velocidad de propagación de llama baja, inferior a 10cm/s.
 - **Categoría 3:** Ensayo igual que categoría dos, límite inferior de inflamabilidad (mezcla con aire inferior al 3,5% en volumen (V/V) y un calor de combustión mayor que 19.000 kJ/kg.

2.3.1.3. - *Propiedades de interés de los refrigerantes* ^{15 16}

A continuación, se recogen de manera tabulada las propiedades fisicoquímicas más relevantes de cada refrigerante que se ha seleccionado, propiedades en base a las cuales se podrá establecer la aptitud de cada refrigerante para su uso, además de poder tener una idea de su comportamiento en el ciclo térmico. Hay que destacar que las propiedades de mayor interés para hacer un análisis de viabilidad y comparativa entre los refrigerantes elegidos son las siguientes:

- **Temperatura congelación:** Con objeto de evitar congelación en el evaporador.
- **Volumen específico bajo:** Con objeto de evitar tuberías de grandes dimensiones.
- **Calor latente de cambio de fase elevado:** De manera que se consiga intercambiar gran cantidad de energía con poco gasto masico.
- **Densidad elevada.** De modo que ocupen un menor espacio, con relación al volumen específico.
- **No tóxicos, ni corrosivos, ni inflamables.**
- **Detectable en fugas.** Importante de cara a la seguridad
- **No afectar a otros materiales y debe poder mezclarse con aceites.**
- **Estable.** Con los cambios de temperatura.

¹⁵ (Climalife, 2024)

¹⁶ (A.Rodríguez, 1981)

Tabla 2. Tabla comparativa de propiedades refrigerantes estudiados. (Climalife, 2024)

Fórmula química	Amoniaco R717	Aqua R718	Propano R290	Pentano R601
Masa molecular g/mol	17	18	44,1	72,15
Densidad del líquido saturado a 25 °C kg/m ³	602	1262,8	492	-
Temperatura crítica °C	132,35	374	96,7	196,6
Presión crítica bar	113,53	220,6	42,51	33,68
Calor latente de vaporización a 1.013bar kJ/kg	1367,9	2257	425,6	400,55
Calor específico del líquido a 25 °C kJ/(kg.K)	4,78	4,18	2,719	2,25
Calor específico del vapor a 25 °C y 1.013bar kJ/(kg.K)	2,16	1,8723	1,6794	2
Clasificación de seguridad ISO 817 / ASHRAE 34	B2L	A1	A3	A3
Potencial de agotamiento del ozono (ODP)	0	0	0	0
Potencial de Calentamiento Global (GWP) IPCC AR4/IPCC AR5	0	0	3	5

Teniendo ya elaboradas las tablas de propiedades de los refrigerantes, para realizar el estudio hay que establecer primero que propiedades son las más relevantes o de mayor interés a la hora de justificar el uso de un refrigerante u otro.

Para justificar las propiedades más adecuadas del fluido para un buen comportamiento en el ciclo, y que este sea viable y no propenso a sufrir averías, podemos pararnos a pensar en porque no se utiliza el agua como refrigerante, pues es muy abundante, barata, no es corrosiva además de ser estable y que su uso es muy seguro, aparentemente es un fluido idóneo con un punto crítico muy elevado, pero actualmente no se utiliza para este fin y hay que pararse a pensar por qué.

En la práctica no es viable utilizar vapor de agua como refrigerante porque para poder trabajar a una temperatura adecuada, foco frio en torno a 20°C/25°C, en el evaporador la presión tendría que ser muy pequeña, 0,006atm, lo que cual es trabajar en vacío prácticamente, porque a presión atmosférica la temperatura del foco frio (evaporador) tendría que ser de 100°C y esto en la práctica no es adecuado ya que un sistema trabajando en vacío es mucho más costoso además caro de mantener pues es propenso a perder la estanqueidad. Además, otro motivo importante es que el vapor de agua tiene una densidad muy pequeña, esto es, un volumen específico muy elevado lo que implica la necesidad de sobredimensionar las tuberías y el compresor para trabajar con un volumen tan grande, lo que supone un consumo elevado en el mismo.

Entonces con esto ya se han establecido tres requisitos indispensables:

- **Bajo punto de ebullición**, para tener una temperatura y presión adecuadas en el evaporador.
- **Volumen específico bajo (o lo que es lo mismo, una densidad elevada)**, para no tener que sobredimensionar ni las tuberías ni el compresor, así controlar un consumo energético adecuado.
- **Elevado peso molecular**, esto implica el que tenga una elevada densidad

Surgió la necesidad de encontrar fluidos refrigerantes que cumplieran estos requisitos, lo que fomento la investigación en este campo y con las que se listó una serie de fluidos adecuados en la práctica, también se establecieron otras características importantes para tenerlas en cuenta.

Las más relevantes se enuncian a continuación, extraído de la referencia (A.Rodríguez, 1981).

1. Temperatura y presión de ebullición.

Fundamentalmente el elemento critico es el evaporador, en el cual conviene tener una presión mayor que la atmosférica, es decir, que el fluido frigorígeno tenga una presión de ebullición mayor a la atmosférica. De ese modo el equipo no funcionará en vacío, situación en la que el sistema es más

propenso a sufrir cualquier filtración en la que podría admitir aire y humedad en el circuito, que para evitar sería necesario sobredimensionar las paredes de los tubos, y esto además de encarecer el sistema, dificultaría el intercambio de calor.

2. Temperatura de congelación.

Característica importante para tener en cuenta, pues hay que considerar que este esté lejos de la temperatura mínima que se alcanza en el proceso.

3. Temperatura y presión críticas.

Interesa que estas sean elevadas para que el sistema trabaje siempre por debajo lejos del punto crítico.

4. Presión media de operación.

Interesa trabajar con una presión adecuada, no muy elevada, teniendo en cuenta que los componentes más críticos, evaporador y condensador, tendrían que sobredimensionarse de manera que pudieran trabajar a esas presiones elevadas, esto encarecería el sistema además de que el salto de presión en el compresor sería elevado y requeriría un consumo alto de energía reduciendo el rendimiento.

5. Volumen específico pequeño.

Esto es, una densidad grande, como antes se ha explicado, es fundamental tener un volumen específico pequeño. Esta propiedad está relacionada directamente con un **peso molecular** elevado.

6. Calor latente y calor específico.

Es muy conveniente que el calor latente de cambio de fase del fluido sea elevado, de ese modo el flujo de calor en el cambio de fase será elevado y esto mejora el COP del ciclo, aumentando el flujo de calor por unidad de masa. Por otro lado, interesa que el calor específico del líquido sea pequeño ya que teniendo en cuenta que la expansión se hace mediante una válvula de estrangulamiento, proceso en el cual se produce la vaporización de parte del fluido, una fracción x (título de vapor), esta vaporización requiere calor, por lo que la temperatura se reduce. Haciendo un balance de energía:

$$Cp (tc - td) = \lambda x \rightarrow x = \frac{Cp (tc - td)}{\lambda}$$

(Ecuación 1)

Donde:

Cp (J/Kg*K); t (K); λ (Coef. temperatura)

Donde podemos ver que cuanto menor es el vapor específico menor es el título de vapor (o fracción de líquido que se vaporiza) durante la estrangulación, esto es ideal porque el vapor que se forma en esta etapa actúa como fluido inerte en el evaporador y no produce flujo de calor, además de que consume energía ya que sí que pasa por el compresor.

Es importante tener en cuenta estas características, tener un alto calor latente y un bajo calor específico implica un mayor flujo de energía para un mismo flujo masico y por ende un mismo consumo en el compresor, lo cual aumenta el rendimiento de todo el ciclo o avara costes para mantener un mismo flujo de calor ya que se requiere menor flujo masico.

7. Coeficiente de dilatación adiabática.

Interesa que este sea lo más cercano a 1 para que la temperatura máxima alcanzada a la salida del compresor sea lo más baja posible, de ese modo el condensador tendrá unas dimensiones menores. Aparte de que cuando la temperatura de salida del compresor es elevada, estos fluidos presentan mayores problemas tanto de formación de lodos como durante el proceso de separación fluido-aceite.

Este coeficiente también está íntimamente relacionada con la masa molar del fluido, siendo este más cercano a 1 cuanto mayor es el peso molecular y cuanto más cercano a 1 es menor temperatura máxima se alcanzada a la salida del compresor.

8. Miscibilidad del fluido frigorífico.

Es necesario que el fluido se pueda mezclar con el aceite lubricante existente en el circuito para que pueda ser arrastrado y lubricar el compresor correctamente

9. Viscosidad baja.

La viscosidad produce pérdidas por fricción en las tuberías y válvulas a lo largo del recorrido del fluido por lo que interesa que esta tenga un valor bajo, de ese modo el compresor no tendrá que aumentar el consumo para sopesar estas pérdidas.

10. Seguridad.

Los fluidos frigoríficos tienen que cumplir con la clasificación A según la norma ASHRAE 34, ya que existe la posibilidad de que haya fugas en un determinado momento y para evitar problemas de salud en los operarios o todo aquel susceptible de inhalar el fluido estos no pueden ser tóxicos; Tampoco pueden contaminar el medio ambiente, ODP 0 deseable, y GWP mínimo, ni ser inflamables o explosivos.

11. Conductividad térmica.

Es muy deseable que el líquido tenga gran conductividad térmica, así el flujo de calor tanto en el condensador como en el evaporador será mucho más eficiente.

12. Baja capacidad de corrosión.

Es deseable que el fluido sea inerte en este, para mantener la instalación bien y evitar costes de daños derivados por este fenómeno.

13. Costo.

Un aspecto fundamental para tener en cuenta son los costes, el fluido debe ser económico.

14. Estabilidad.

El fluido tiene que ser y mantenerse estable a lo largo de toda su vida útil,

En base a las características de especial relevancia a las que hay que atender a la hora de seleccionar un refrigerante, se va a analizar cada uno de los refrigerantes escogidos de los cuales se tabularon sus propiedades anteriormente y así calificar la aptitud para su uso en el ciclo térmico con bomba de calor de modo que se pueda justificar la elección de los refrigerantes que finalmente se aplicaran en los estudios paramétricos.

- **Amoníaco seco (R717).** Resulta muy interesante ya que tiene un buen comportamiento como refrigerante, tiene un elevado calor latente, bajo coste y se puede trabajar con él con presiones moderadas. Su uso sigue siendo muy interesante y extendido a pesar de que si es toxic, irritante tanto para los ojos como para pulmones y nariz, incluso inflamable en grandes cantidades. Interesa también ya que no es corrosivo junto a aleaciones ferrosas, aunque si junto a aleaciones de cobre con materiales como el bronce, el latón, y el aluminio, aunque este último en menor medida.
- **Agua (R718).** Tiene propiedades muy interesantes desde el punto de vista práctico, como una gran estabilidad, no reacciona con otros materiales, no es corrosivo, tiene un elevado punto crítico, tiene un elevado calor latente de cambio de fase y un calor específico alto, no es toxic ni combustible, tiene ODP (Potencial destrucción de la capa de ozono) y GWP (Potencial de calentamiento global) nulos, y se encuentra de forma natural en la naturaleza, siendo su ciclo de regeneración de un año por lo que su uso sería sostenible, aparentemente es el fluido perfecto ya que sus propiedades son muy buenas, pero hay otros aspectos que no lo hacen apto para su uso como refrigerante, pues bien, como antes se ha explicado, el punto de ebullición tiene que ser bajo para poder llevar a cabo la evaporación en un área a temperatura

ambiente, en este caso la temperatura de ebullición es de 100°C lo que implicaría trabajar casi en vacío en el evaporador para poder llevar a cabo el cambio de fase a 25°C, además su masa molecular es pequeña por lo que su densidad no es muy elevada y tiene un volumen específico muy elevado, lo que implica que serían necesarias unas tuberías de mayor diámetro y un compresor de mayores dimensiones, para poder trabajar bien el flujo, esto aumenta mucho el consumo reduciendo el rendimiento del sistema. No es imposible utilizarlo como fluido refrigerante, pero si implica un sistema costoso y con alto consumo energético, además de un mantenimiento habitual.

- **R1233zd.** Este fluido refrigerante es muy interesante, pues sus propiedades lo hacen apto para su uso. Tiene un elevado peso molecular, lo que implica una elevada densidad, o lo que es lo mismo un bajo volumen específico, esto favorece un menor consumo en el compresor y una instalación menos sobredimensionada, además su temperatura de ebullición es baja, de en torno a 18°C, lo cual hace factible el paso por el evaporador en la que se puede trabajar a presiones próximas a la atmosférica y trabajar en un área con una temperatura posible en lo que sería un entorno industrial, tiene elevado punto crítico, presión y temperatura por lo que mantiene su estabilidad con seguridad, es de clase A1, ni tóxico ni explosivo, y además no contamina (ODP y GWP 0), propiedad deseada para todo fluido con el que se trabaje, su calor latente no es muy elevado pero al tener un volumen específico bajo se puede aumentar el caudal para conseguir el flujo de calor deseado hacia el foco caliente, igual su calor específico, que no siendo muy elevado tiene un valor suficiente para su uso.
- **R1336mzz.** Muy similar al R1233zd, también tiene un elevado peso molecular, elevada densidad y un bajo volumen específico, su punto crítico es elevado, lo que favorece la estabilidad, es de clase A1, su ODP es nulo Y GWP mínimo, a diferencia de R1233zd, su temperatura de ebullición es de 33°C a presión atmosférica, un poco superior pero aun así es un valor que no supone un problema ya que sigue estando en el entorno de la temperatura ambiente estándar, su calor latente tampoco es muy elevado, al igual que su calor específico.
- **Propano (R290).** Este fluido refrigerante es un hidrocarburo, desde el punto de vista de la seguridad esto no es deseable ya que es tóxico y explosivo, clasificación A3, pero tiene propiedades que lo hacen muy interesante desde el punto de vista práctico, no tiene un elevado peso molecular pero aun así su volumen específico no es muy elevado, por lo que en este aspecto no hay problema, su temperatura de ebullición es de -42°C a presión atmosférica,

por lo que se puede trabajar bien y en condiciones adecuadas en el evaporador para evaporar a temperatura ambiente de 25 °C, tiene un punto crítico elevado, ideal para trabajar a alta temperatura manteniendo la estabilidad, tiene un ODP nulo y un GWP bajo, elevado calor específico y un calor latente de cambio de fase, no muy elevado pero con un valor adecuado.

- **Isopentano (R601a).** Este fluido también es un hidrocarburo, clasificación A3, ODP nulo y GWP bajo, tiene un elevado peso molecular lo que implica un bajo volumen específico y elevada densidad, su temperatura de ebullición está en torno a 25°C a presión atmosférica, tiene un punto crítico elevado lo que lo hace apto para trabajar a alta temperatura, alto calor específico y un calor latente de cambio de fase no muy elevado.
- **Pentano (R601).** Hidrocarburo, clasificación de seguridad A3, peso molecular adecuado para tener volumen específico bajo, elevada densidad, punto crítico elevado, con una temperatura de ebullición de 28°C a presión ambiente, ODP nulo y GWP bajo, y al igual que el isopentano tiene un punto crítico elevado lo que lo hace apto para trabajar a alta temperatura, con un alto calor específico y calor latente de cambio de fase no muy elevado.

Atendiendo a las propiedades de los distintos refrigerantes estudiados, se realizará un estudio teórico para implementación en los ciclos, simulando con COFE-COCO, los distintos refrigerantes.

Esta elección es en base al interés debido a las propiedades específicas de cada uno de ellos, cada uno tiene sus pros y sus contras, pero son interesantes desde el punto de vista de su implementación.

2.4. – Componentes de la instalación ¹⁷

Es importante estudiar los diferentes componentes de nuestra instalación, ya que son los que hacen posible conseguir un determinado nivel térmico, trabajar con una determinada presión y el tipo de refrigerante que se puede utilizar. Existen distintos tipos de componentes para trabajar en condiciones óptimas bajo unas determinadas condiciones operativas, así como con un fluido refrigerante concreto por lo que se hace un estudio de los componentes que se utilizan y sus variantes para las distintas situaciones.

- **Evaporador.** Este es uno de los elementos clave del sistema de refrigeración, su función es absorber el calor del ambiente del espacio que se quiere enfriar, es decir extrae la energía del entorno en el que se sitúa, mediante el cambio de fase del fluido refrigerante que viene de la válvula de expansión a baja presión y temperatura en estado líquido y al pasar por el evaporador se produce el cambio de fase a estado gaseoso.



Ilustración 9. Evaporador típico de una instalación frigorífica (Evaporadores, 2016)

- **Compresor.** El siguiente elemento que se encuentra en la instalación es el compresor, en el que llega todo el fluido refrigerante en estado gaseoso y donde se produce un aumento de la presión.



Ilustración 9. Compresor típico de una instalación frigorífica.

- **Condensador.** Tras pasar por el compresor y aumentar la presión el fluido llega al condensador donde se produce el cambio de fase a estado líquido de nuevo, mediante la liberación de calor hacia el ambiente donde se sitúa, en función de la presión el fluido cambiara de fase a una

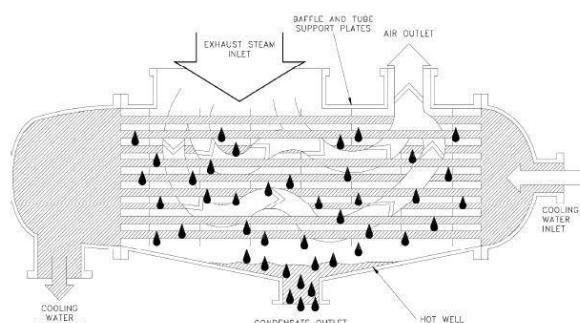


Ilustración 10. Esquema de un condensador típico de una instalación frigorífica

¹⁷ (A.Rodríguez, 1981)

temperatura, mayor o menor en función del calor latente de cambio de fase. Este es el elemento del cual extraemos el calor necesario para utilizar en el proceso industrial que deseemos.

- **Válvula de expansión.** Después del condensador, tenemos el fluido de nuevo en estado líquido, pero se mantiene a alta presión por lo que es necesario pasar por la válvula de expansión que restrinja su paso de modo que se reduzca la presión hasta alcanzar el valor de baja presión del circuito.
- **Tuberías circuito.** Las tuberías del circuito necesitan para un correcto del sistema aunar propiedades específicas para soportar la circulación del refrigerante por el circuito y ser capaces de soportar las altas presiones, las altas temperaturas y los medios agresivos a los que se exponen.
- **Refrigerador intermedio.** Este se incluye en ciclos de compresión en etapas múltiples, de manera que se produzca una refrigeración del fluido refrigerante tras cada etapa de compresión para mantener la temperatura en un valor constante y controlado, ya que la compresión no es del todo isotérmica y siempre se produce un aumento de la temperatura.
- **Filtro.** Es indispensable disponer de filtros en el circuito de refrigeración para retener y bloquear todo tipo de impurezas, partículas y humedad que puedan generarse para evitar el daño que pueda producirse en los distintos elementos de la instalación, fundamentalmente en el compresor.



Ilustración 11. Válvula de expansión típica de una instalación frigorífica



Ilustración 12. Tubería típica de circuito de una instalación frigorífica

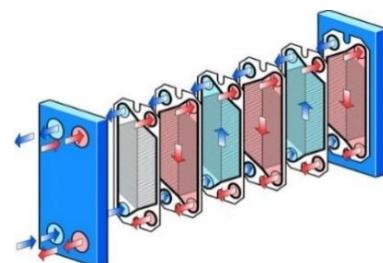


Ilustración 13. Refrigerador intermedio típico de una instalación frigorífica (intercambiador)



Ilustración 14. Filtro típico de una instalación frigorífica

- **Separador.** Este es un elemento también de vital importancia en la instalación, podemos encontrar dos tipos de separador con distintas funciones.

- **Separador de líquido y succión.**

Su objetivo es evitar que el refrigerante en estado líquido entre en el compresor, ya que tras pasar por el evaporador esta evaporación no es completa.

Así evitamos que se puedan causar daños graves al compresor, este fenómeno es conocido como "golpe de líquido", y destruye las turbinas del compresor.



Ilustración 15. Separador de líquido típico de una instalación frigorífica

- **Separador de aceite.**

Se utiliza para separar el aceite del fluido refrigerante a la salida del compresor, este aceite proviene del compresor y es necesario para lubricar las partes móviles del compresor.

Se instala en la salida del compresor, antes de que el refrigerante llegue al condensador.



Ilustración 16. Separador de aceite típico de una instalación frigorífica

Estos separadores tienen importantes beneficios, brindan protección al compresor, evitando la entrada de líquidos al mismo, y favorecen la separación de aceite y fluido refrigerante a la salida de este, reduciendo la necesidad de mantenimiento del sistema, además de aumentar la vida útil de los componentes del sistema.

Una representación de la instalación descrita puede ejemplificarse con la siguiente figura.

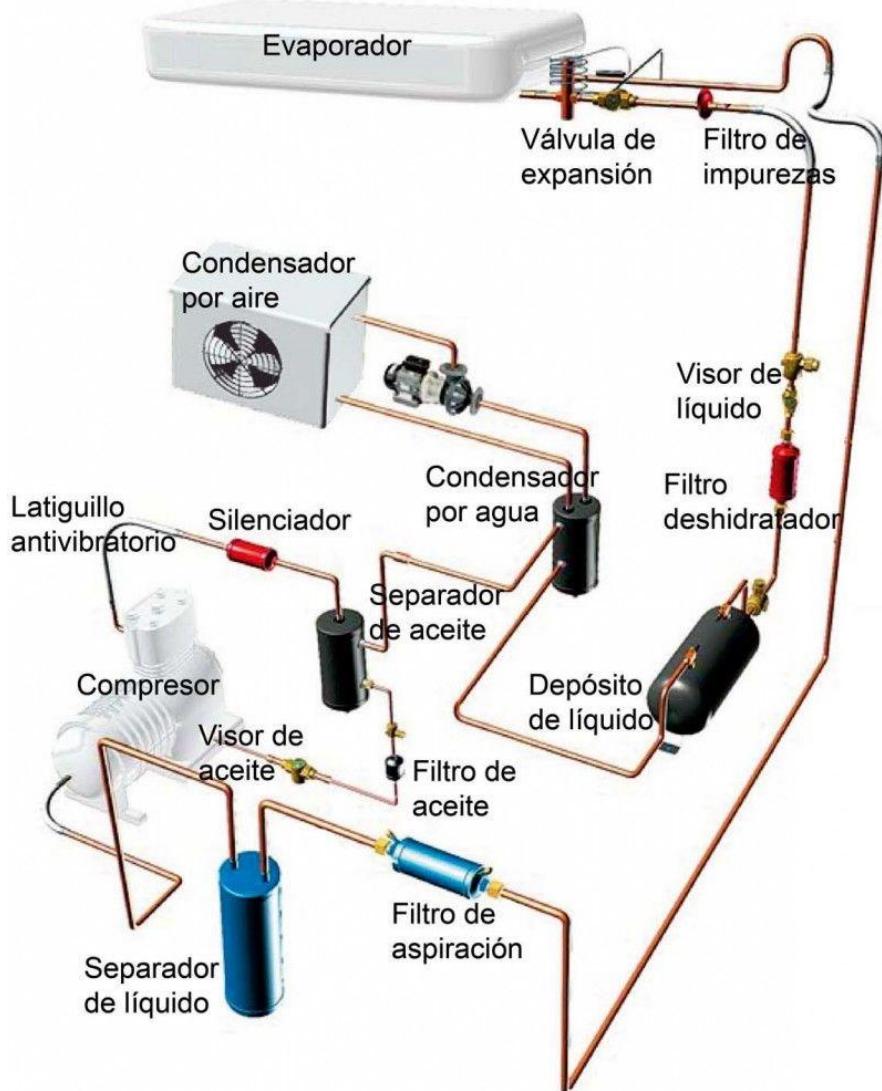


Ilustración 17. Ejemplo esquema instalación frigorífica típica.

Esta instalación representa un sistema de refrigeración, en nuestro caso el conjunto actúa como bomba de calor para aprovechar la alta temperatura del punto caliente para su uso en procesos industriales. Se puede ver en el esquema cómo se incluyen todos los elementos antes mencionados, y adicionalmente todos los elementos necesarios para poder asegurar el correcto y buen funcionamiento de la instalación.

2.4.1.- Componentes de alta temperatura ^{18 19}

En la instalación estudiada en este proyecto es imprescindible trabajar a altas temperaturas para poder llevar a cabo determinados procesos industriales, algo fuera de lo habitual cuando se trabaja con este tipo de sistemas, por lo que los componentes que se utilizan tienen que ser capaces de trabajar a este nivel térmico y actualmente todavía se está investigando y desarrollando este tipo de componentes, a continuación, se recogen los componentes más relevantes y críticos en este aspecto.

- Condensador.
- Evaporador.
- Compresor.
- Circuito (Tuberías, uniones, válvulas, filtros...).

Todos ellos tienen la característica común de que es imprescindible que soporten las altas temperaturas para poder llevar a cabo estos procesos. Como hasta ahora no se ha desarrollado este tipo de instalación aún está en desarrollo conseguir nuevos componentes con estas prestaciones por lo que con este trabajo se van a ver de manera teórica las condiciones a las que se van a someter y por ende que deben de ser capaces de soportar. Analizando principalmente las temperaturas y presiones máximas a las que se van a exponer y en la actualidad los procesos que más temperatura requieren en los que se aplica bomba de calor son el campo de la aerotermia, y ronda los 80°C de temperatura máxima por lo que partiendo de esa base es posible llegar a conseguir soportar 120°C en relativamente poco tiempo.



Ilustración 18. Ejemplo sistema bomba de calor para alta temperatura

Ya existen opciones comerciales de bombas de calor para su aplicación en procesos industriales, en este tipo de bombas comerciales se utilizan refrigerantes como el convencional R-134a, en este caso esta bomba de calor comercial de alta temperatura a la que se hace alusión tiene un rango de temperaturas muy variado que va desde los 55°C a 95°C, lo que la hace ideal para su uso en aplicaciones de calefacción industrial y otras actividades en este rango de temperaturas.

¹⁸ (A.Rodríguez, 1981)

¹⁹ (H.Stars Group, 2025)

Hablando de los rendimientos que se pueden conseguir, en la situación más crítica que es trabajando a la máxima temperatura admisible obtenemos un coeficiente de rendimiento (COP) de 2,3 al bombear agua a 90 °C, este rendimiento tenderá a aumentar conforme se consolide este tipo de aplicación y se desarrolle nuevos elementos específicos para altas temperaturas, todo esto la convierten en una fuente de energía altamente eficiente. Esta opción comercial, además incluye un ajuste opcional que es la de recuperación de frío con el que se consigue agua fría en un rango de 5 °C y -30 °C.



Ilustración 19. Bomba de alta temperatura comercial (H.Stars Group, 2025)

En definitiva, esta tecnología es una solución completa y versátil a medio y largo plazo para su implementación en procesos industriales y otros actividades que demanden altos niveles térmicos y con altos estándares de eficiencia y rendimiento, construyendo el camino hacia la descarbonización industrial, reduciendo emisiones y aprovechando los recursos de energías renovables.

Este ejemplo de bomba de calor comercial dispone de varios modelos, para hacernos una idea de las características operativas del sistema y ver cómo trabaja, consumo energético, dimensiones del equipo, etc. Se puede ver la siguiente tabla que recoge esta información.

Tabla 3. Características modelos comerciales de bomba de calor (H.Stars Group, 2025)

Modelo	Capacidad nominal de calefacción		Alimentación kW	Control de capacidad %	Carga de refrigerante kg	Condensador				Evaporador/Ventilador			Nivel sonoro dB(A)	Peso del envío kg	Peso operativo kg
	KW	USRT				Diámetro de la tubería (entrada/salida) pulg.	Flujo de agua m3/h	Presión de agua MPa	Pérdida de presión de agua kPa	Cantidad	Flujo de aire m3/h	Potencia			
80HW-M45/20AHS4	404	115	179	10 75 100	85	3"	69	1	53	6	144000	12	75	2650	2900
80HW-M55/25AHS4	462	131	208		95	3"	79	1	54	6	144000	12	76	2750	3050
80HW-M65/32AHS4	604	172	253		125	4"	104	1	55	8	192000	16	77	2850	3200
80HW-M83/41AHS4	732	208	305		150	5"	126	1	56	8	192000	16	78	3000	3250
80HW-M45/20AHD4	807	230	357		170	5"	139	1	68	12	288000	24	79	3500	3750
80HW-M55/25AHD4	924	263	417		190	5"	159	1	69	12	288000	24	80	3700	3950
80HW-M65/32AHD4	1207	343	505		250	8"	208	1	74	16	384000	32	86	3860	4110
80HW-M83/41AHD4	1463	416	611		300	8"	252	1	80	16	384000	32	90	3970	4220

CAPITULO 3. Modelos de ciclos de bomba de calor con herramienta COCO

3.1. – Ciclos frigoríficos utilizados ^{20 21 22}

La refrigeración se utiliza para extraer calor de un lugar (foco frío) y lo emitirlo en otro (foco caliente), bajo este fundamento construimos los sistemas de refrigeración, utilizados en refrigeración industrial, industria alimentaria (cámaras frigoríficas), condensación de vapores, aires acondicionados y diversas aplicaciones en las que se aprovecha este fenómeno físico.

Existen distintas clases de procesos frigoríficos, este proyecto está centrado en el más extendido a nivel industrial, doméstico y comercial, es el proceso mediante compresión de vapor, este proceso produce, como antes se ha explicado, una foco frío (del que se extrae calor) y lleva esa energía mediante el fluido refrigerante a un foco caliente (donde emite ese calor), el fundamento de este proceso es el uso de un compresor para comprimir el fluido refrigerante, consumiendo energía mecánica, para llevarlo hasta un condensador, donde cambia de fase y libera ese calor latente de cambio de fase (foco caliente) para después pasar por una válvula de expansión donde reduce su presión para llegar al evaporador, donde absorbe energía (foco frío) y cambia de fase a estado vapor para nuevamente pasar por el compresor y completar el ciclo.

Un esquema bastante claro de este proceso es el de la siguiente imagen.

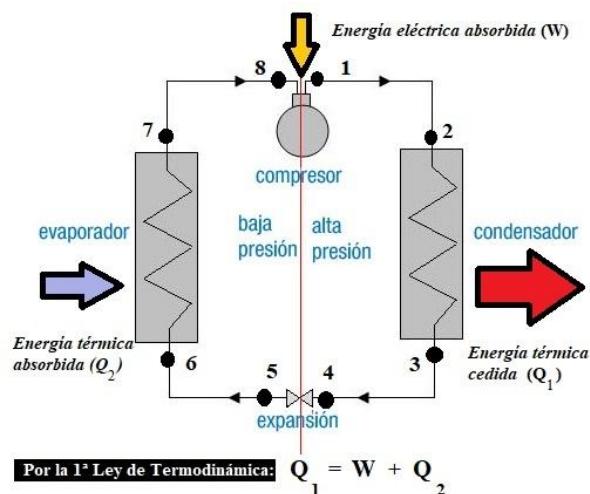


Ilustración 20. Máquina frigorífica elemental (Ministerio de Educación, Cultura y Deporte., 2025)

²⁰ (A.Rodríguez, 1981)

²¹ (Frigopack, 2023)

²² (Ministerio de Educación, Cultura y Deporte., 2025)

Como se puede apreciar, tenemos un foco frío del que se extrae calor, Q_1 , y mediante compresión (consumo de trabajo, W) se traslada hasta el foco caliente, donde se libera este calor, Q_0 , claro está que hay que considerar las pérdidas en todo el proceso.

En este proyecto se va a hablar sobre dos variantes del ciclo, el ciclo simple y el ciclo en cascada y etapas múltiples de compresión, una vez introducidos se procederá a la simulación en COFFE-COCO de los dos ciclos con los distintos fluidos refrigerantes para determinar experimentalmente su comportamiento y establecer el nivel térmico que podemos abordar con cada uno de ellos.

3.1.1 - Ciclo simple

El ciclo simple es el que se ha explicado para introducir el ciclo frigorífico, un esquema más detallado del proceso es el siguiente.

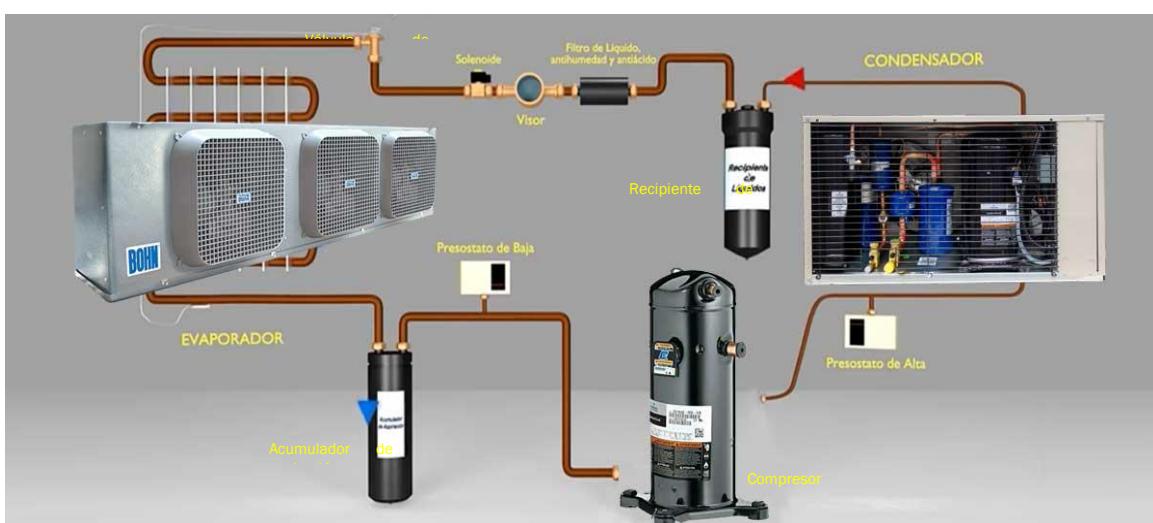


Ilustración 21. Esquema ciclo simple. (Bohn, 2021)

El ciclo simple representado agrupa las distintas etapas del proceso de refrigeración, las principales podrían resumirse en cuatro: 1. Compresión, 2. Condensación, 3. Expansión y 4. Evaporación. Con este ciclo conseguimos extraer calor de un área para liberarlo en otro, consumiendo un trabajo en el compresor. A lo largo del ciclo la sustancia refrigerante que cambia continuamente de estado de líquido a vapor, absorbiendo y liberando el calor. En el caso real se incluyen elementos como el acumulador de aspiración, que es un depósito temporal para retener la cantidad en exceso de la mezcla refrigerante y aceite que está en estado líquido para después liberarla ya en forma de gas, de modo que el compresor trabaje con una cantidad que pueda manejar de manera adecuada y evitar el deterioro del mismo; Un recipiente de líquidos o también denominado recipiente, el cuál es un depósito cilíndrico que se incorpora a la salida del condensador de manera que almacena la cantidad en exceso de refrigerante, en estado líquido, que no está circulando en el sistema actuando como reserva para mantener un comportamiento estable según

las diferentes circunstancias de funcionamiento así como proveer, de manera constante e ininterrumpida refrigerante líquido hacia la válvula de expansión, por último la tercera función del recipiente es almacenar todo el líquido refrigerante para poder realizar las tareas de mantenimiento o cualquier reparación en el circuito; Otro elemento importante es el filtro de líquido antihumedad y antiácido, es un dispositivo el cual contiene material desecante y filtrante para proteger de humedad y contaminantes el circuito. (Frigopack, 2023)

Se pueden realizar ciertas mejoras para aumentar la eficiencia del ciclo, como, por ejemplo:

- **Efecto de disminuir la temperatura en el condensador:**

Atendiendo al diagrama T-S que se muestra a continuación (*Ilustración 22. Diagrama T, S Ciclo simple modificado. Introducción a la termodinámica*), el punto c se desplazaría hacia la izquierda por lo que también lo hará el punto d, consiguiendo así un título inferior, una menor proporción de vapor y con esto conseguimos que la aumente la proporción de líquido y, por ende, también aumenta la cantidad de calor absorbida por el fluido en la etapa de evaporación.

En la práctica para conseguir esto se puede proceder de varias maneras.

1. Disponer de un fluido de enfriamiento en el condensador de menor temperatura. Así la temperatura del líquido refrigerante a la salida del condensador será menor.
2. Otra forma es realizar un mantenimiento preventivo y habitual para mantener las condiciones de operación en las de diseño.
3. Por último, este efecto también se puede conseguir utilizando un condensador de mayores dimensiones, esto se debe a que al tener una mayor superficie aumenta el grado de enfriamiento y con ello reducimos temperatura a la salida del condensador.

- **Efecto de subenfriamiento del líquido a la salida del condensador:**

Al salir del condensador, el fluido pasa por la válvula de estrangulamiento para reducir la presión y como este es un proceso isoentálpico se produce una mezcla líquido-vapor, en la que interesa que antes de entrar al evaporador la fracción de líquido sea la máxima posible, o sea un menor título de vapor, de ese modo maximizaremos el efecto frigorífico aumentando el calor absorbido en la evaporación. Con objeto de reducir la fracción de vapor a la llegada al evaporador, se va a subenfriar el líquido a la salida del condensador, así a la salida del condensador en vez de estar en el punto de líquido saturado (punto c) estaremos con líquido subenfriado (punto c') y esto

situara el punto d más a la izquierda, consiguiendo un salto entálpico mayor en el evaporador manteniendo el flujo masico de refrigerante.

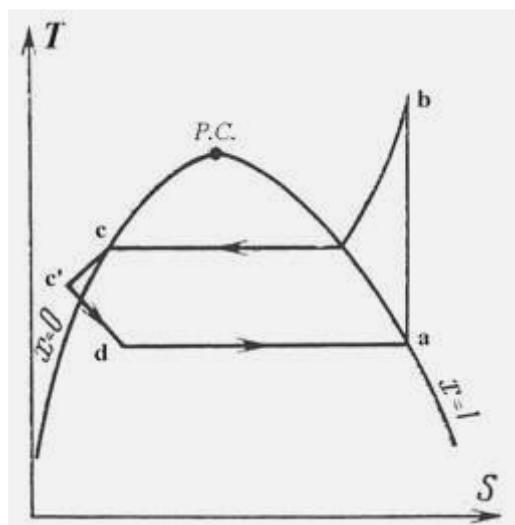


Ilustración 22. Diagrama T, S Ciclo simple modificado. Introducción a la termodinámica (A.Rodríguez, 1981)

- **Efecto de calentar el vapor a la entrada del compresor.**

El objetivo es sobrecalentar el vapor a la salida del evaporador antes de que entre al compresor, el efecto que tiene realizar este calentamiento es asegurar que al compresor únicamente entre fluido en fase gas, nada de líquido. Realizar esto tiene consecuencias que hay que tener en cuenta, al estar el fluido más caliente, su volumen específico es mayor, esto implica un aumento de la tubería de succión del compresor para no aumentar el cuello de botella que esto genera en el proceso, además la carga del compresor será mayor por lo que incluso puede llegar a ser necesaria la utilización de un compresor más grande capaz de trabajar en estas condiciones para no sobrecargarse; ambas soluciones son costosas.

Para aumentar la eficiencia del ciclo, también pueden incorporarse más elementos, como por ejemplo otro compresor, de ese modo se consigue una compresión en cascada, normalmente, se realiza en dos etapas como se explica en el siguiente apartado, el objetivo de estas modificaciones persigue el aumento del poder frigorífico del ciclo, aumentar rendimientos y mejorar el comportamiento del fluido, así como ser capaces de aumentar la diferencia entre temperaturas de los focos frío y caliente.

3.1.2 - Ciclo compuesto

En este ciclo, a diferencia del ciclo simple, la etapa de compresión se realiza en varias etapas, que normalmente son dos, con lo que se consigue aumentar el rendimiento ya que el salto de presión en cada etapa no es tan elevado.

Esta metodología plantea distintas alternativas.

- Ciclo con compresión en varias etapas con inter-enfriamiento.
- Ciclo con compresión auto enfriada en varias etapas.
- Ciclo con compresión en varias etapas a inyección parcial.
- Ciclo con compresión en varias etapas a inyección total.

De las que a continuación, se describirá la que es de especial interés para su aplicación práctica, y se implementará en COCO. Hay que tener en cuenta que estas configuraciones encarecen y complican el equipo por lo que solo se utilizan en grandes instalaciones.

Ciclo con compresión en varias etapas a inyección parcial

Teniendo en cuenta que el fluido frigorífico sale de la válvula de expansión a una temperatura más baja que la ambiente, lo cual sucede en climas cálidos o templados, se podría ahorrar el instalar el enfriamiento a la salida del compresor de baja, aprovechando el propio fluido refrigerante para refrigerar la corriente antes de llegar a la segunda etapa de compresión, eliminando por completo la necesidad del enfriador intermedio y de la segunda válvula de expansión, reduciendo el coste de la instalación y operativo.

A este tipo de instalación se le denomina ciclo a inyección, disposición que consta de dos variantes:

- Disposición a inyección parcial
- Disposición a inyección total.

Ciclo con compresión en varias etapas a inyección parcial

En la disposición a inyección parcial se mezcla una parte del líquido que proviene del condensador, que llega a un separador líquido-vapor el cual recibe el vapor de alta presión, mezclándose con el vapor caliente que proviene de la etapa de baja presión. El resto se envía a la válvula de expansión del ciclo convencional, de la que sale la mezcla de líquido y vapor.

Un esquema de esta instalación se muestra a continuación:

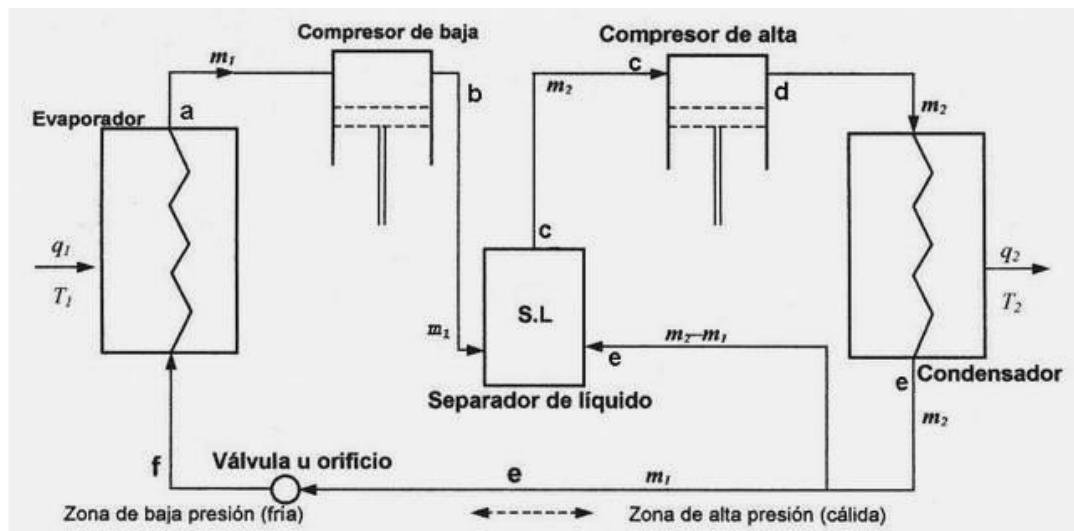


Ilustración 23. Ciclo por compresión auto-enfriada, a inyección parcial. (A.Rodríguez, 1981)

Donde se puede observar la ausencia del enfriador intermedio y de la segunda válvula de expansión. En relación con los cálculos se procede de la misma manera que en los otros ciclos, haciendo uso de las ecuaciones antes descritas.

Ciclo con compresión en varias etapas a inyección total

En el caso de inyección total, al separador intermedio llega el total del flujo proveniente del condensador, a una presión media, por lo que es necesario implementar de nuevo una segunda válvula de expansión. El separador intermedio sigue cumpliendo una doble función, separar vapor y líquido y además actuar como mezclador de las corrientes que llegan del compresor de baja y de la válvula de expansión de alta. Esta disposición tiene una eficiencia mayor que la de inyección parcial por lo que es más utilizada en la práctica. Su esquema es el siguiente:

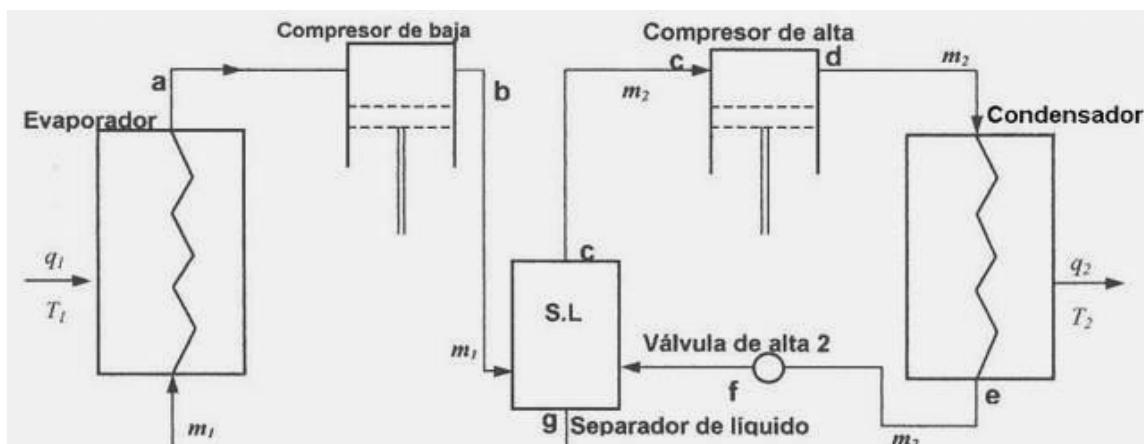


Ilustración 24. Ciclo por compresión auto-enfriada, a inyección total. (A.Rodríguez, 1981)

3.1.3 - Ciclo en cascada

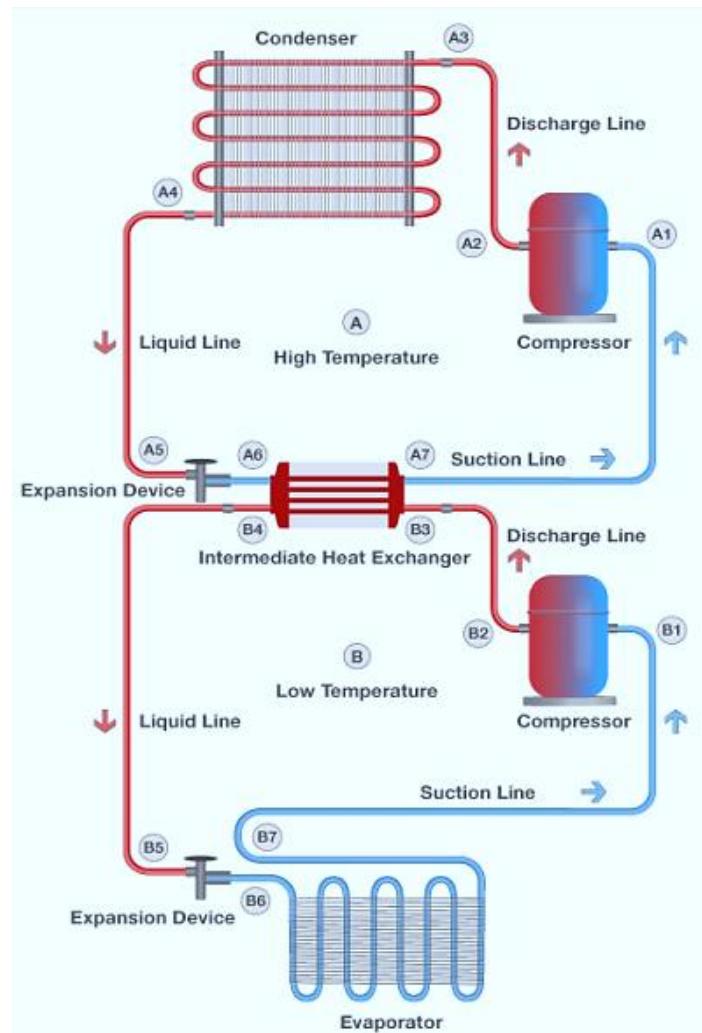


Ilustración 25. Ciclo por compresión en cascada

Con el objetivo de conseguir alcanzar el nivel térmico deseado, se recurre a los ciclos en cascada, estos presentan múltiples ventajas, y es muy importante destacar que permiten el uso de distintos refrigerantes ya que son independientes entre ellos, con lo que se consigue el nivel térmico deseado y se reduce el consumo energético, maximizando el COP.

La solución pasa por una disposición en cascada, en la que el ciclo inicial tiene en común su evaporador con el condensador del ciclo siguiente, que toma calor del anterior para condensar, y a su vez dispone su evaporador como condensador del ciclo siguiente, y así sucesivamente. En teoría se pueden acoplar tantos ciclos en cascada como se desee, pero existen múltiples limitaciones en la práctica por lo que normalmente se opera con dos o tres ciclos en cascada.

El modo de proceder en la práctica a la hora de seleccionar los diferentes fluidos frigoríficos es el siguiente, si consideramos un sistema de tres ciclos en cascada, en el primer ciclo el fluido frigorífico debería tener una temperatura de ebullición aproximadamente la mitad entre la temperatura del agua refrigerante y la del evaporador del segundo ciclo; El fluido frigorífico del segundo ciclo a su vez debería tener un punto de ebullición del orden de la tercera parte de la diferencia entre la temperatura del agua refrigerante y el evaporador del siguiente ciclo, el tercer ciclo.

La temperatura del condensador del primer ciclo, nivel térmico deseado, está fijado por el valor de la cámara fría, o sea la temperatura ambiente en el evaporador del tercer ciclo.

3.2. – Modelado de los ciclos en COCO

Para el estudio teórico se ha utilizado el programa de simulación COFE (COCO), implementando tres modelos diferentes de ciclo para ver el comportamiento de los distintos refrigerantes en la práctica.

Se ha elaborado un modelo de ciclo simple, un modelo de inyección parcial con refrigeración intermedia y un modelo de ciclo en cascada, de modo que, además de comparar el comportamiento de los distintos refrigerantes, se compara también el rendimiento que tienen los distintos ciclos y las ventajas que puede suponer utilizar cada uno de ellos.

A continuación, se muestran los símbolos de los elementos que se van a utilizar para elaborar los ciclos en COCO:

Válvula de expansión

La válvula de expansión será indispensable en todos los ciclos, pues es el elemento que permite realizar el laminado del fluido para pasar de la presión de alta a la presión de baja del ciclo.

Se controlará mediante presión una presión objetivo que impondremos, la presión de baja del ciclo.

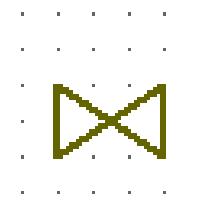


Ilustración 26. Válvula de expansión.
Simbología COCO

Control de caudal

Este elemento es necesario para poder dar una condición de flujo masico (o molar) que queramos imponer para que circule una cantidad determinada de refrigerante por la instalación.

Esta cantidad vendrá determinada por la necesidad de flujo de calor que tengamos en el condensador.



Ilustración 27. Condición de caudal.
Simbología COCO

Condensador y evaporador (Flash)

Para el condensador y el evaporador se ha utilizado una unidad de operación FLASH, a la que se impone que se evapore el 100%, en el evaporador, con salida únicamente en estado vapor, y que se condense el 100% en el condensador, con salida únicamente en estado líquido. De esta manera ya vienen los flujos de calor tanto en el foco frío como en el foco caliente sin necesidad de introducir más variables de control más que la propia imposición de evaporación/condensación total.

Esta unidad de operación da como resultado el flujo de calor que se intercambia en los focos frío y caliente.



Ilustración 28. Condensador y evaporador. Simbología COCO

Mezclador

Esta unidad de operación se utiliza exclusivamente para mezclar varias corrientes, se utilizará en el ciclo de compresión múltiple para poder ejecutar la inyección total.

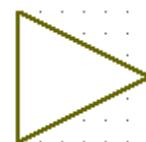


Ilustración 29. Mezclador. Simbología COCO

Compresor

Este es el compresor que se va a utilizar en todos los ciclos, para su control se le impone la presión de salida deseada, además de poder controlar su rendimiento isoentrópico, el cual se ha fijado en un valor comúnmente utilizado, $\eta=80\%$. Como variables de interés nos da información sobre su consumo (kW) para poder evaluar el rendimiento del ciclo (COP).



Ilustración 30. Compresor. Simbología COCO

Calculador

Este elemento se utiliza para calcular distintos parámetros del ciclo, su interés principal radica en que se ha utilizado para evaluar el COP del ciclo, partiendo de los consumos y el flujo de calor obtenido en el condensador. Se configura introduciendo la fórmula que queramos operar con las variables implicadas, las cuales llegan con las corrientes de información.



Calculador

Ilustración 31. Calculador. Simbología COCO

Corriente del circuito

Este es el símbolo que tienen las corrientes del circuito por las que circula el fluido, todas ellas dan información de las propiedades y condiciones de estado del fluido en el tramo por el que circulan.



Ilustración 32. Corriente de circuito.
Simbología COCO

Corriente de Energía

Este es el símbolo de las corrientes de energía en COCO, estas corrientes transmiten flujos de energía de una unidad de operación a otra, con objeto de imponer unas condiciones de funcionamiento etc.



Ilustración 33. Corriente de energía.
Simbología COCO

Corriente de Información

Este es el símbolo de corriente de información, y con ella transmitimos la información deseada desde las unidades de operación al calculador para obtener el resultado deseado, a partir de la fórmula que este configurada en el mismo.



Ilustración 34. Corriente de información.
Simbología COCO

3.3.1 – Implementación de ciclos y simulación

3.3.1.1. Ciclo simple

El primer ciclo que se va a construir es el ciclo simple, para el cual se van a utilizar los siguientes elementos:

- Condensador.
- Evaporador.
- Compresor.
- Calculador.
- Control de caudal.
- Válvula de expansión.
- Corrientes de circuito, energía e información.

Con estos elementos construimos el ciclo simple, que consiste en dos partes bien diferenciadas, la parte de alta presión, donde se ubica el condensador y se

intercambia calor en el foco caliente, y la parte de baja presión donde se absorbe calor del foco frío.

A continuación, se muestra el esquema de ciclo simple elaborado en COCO.

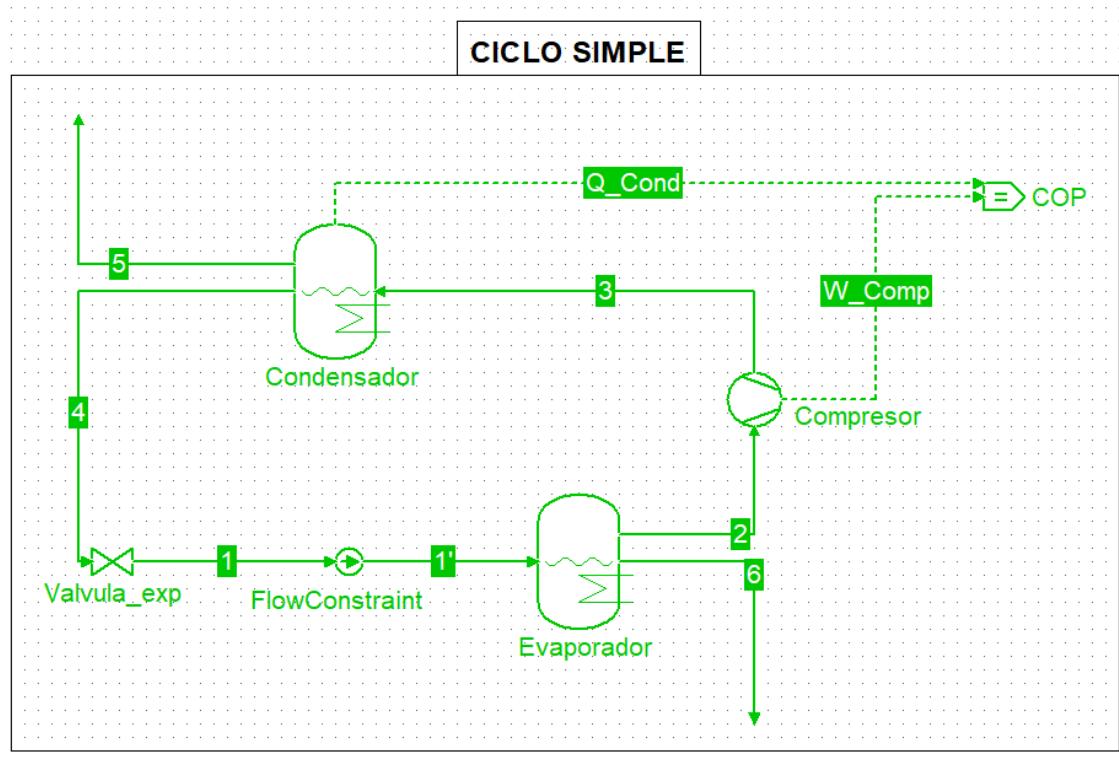


Ilustración 35. Esquema COCO Ciclo simple

Para todos los refrigerantes el ciclo es el mismo, se han creado unas tablas donde podemos extraer condiciones de funcionamiento de cada parte de la instalación además de una tabla de información con los parámetros más relevantes del ciclo.

UO	Parameter	Value	Unit
Condensador	Heat duty	-657.724	kW
Evaporador	Heat duty	487.35	kW
Compresor	Energy demand	170.374	kW
COP	output	3.86047	

Ilustración 36. Tabla de unidades de operación COCO. Ciclo Simple

En la tabla superior se muestran las principales unidades de operación, donde se pueden mostrar los datos resultado de la simulación del ciclo de mayor interés, en este caso aparecen el calor liberado en el condensador, calor absorbido en el evaporador, energía consumida por el compresor y COP del ciclo.

Para cuantificar la calidad con la que intercambiamos calor, rendimiento del ciclo, se evalua el COP del ciclo que, para la configuración de funcionamiento su valor viene dado por la energía obtenida en forma de calor (calor intercambiado en el condensador, Q_{cond}) dividido entre la energía consumida (eléctrica en este caso, W_{comp}). Este parámetro será el que busquemos maximizar variando las condiciones de temperatura y presión a lo largo del ciclo con unas condiciones de contorno dadas, que serán la temperatura del foco frío (temperatura del evaporador), y la temperatura a la que se desea intercambiar calor en el condensador. Además, esta impuesto el flujo mísico que circula por el circuito y que variaremos acorde al flujo de calor deseado.

También se ha elaborado la tabla de condiciones termodinámicas en los distintos puntos del circuito, es la siguiente.

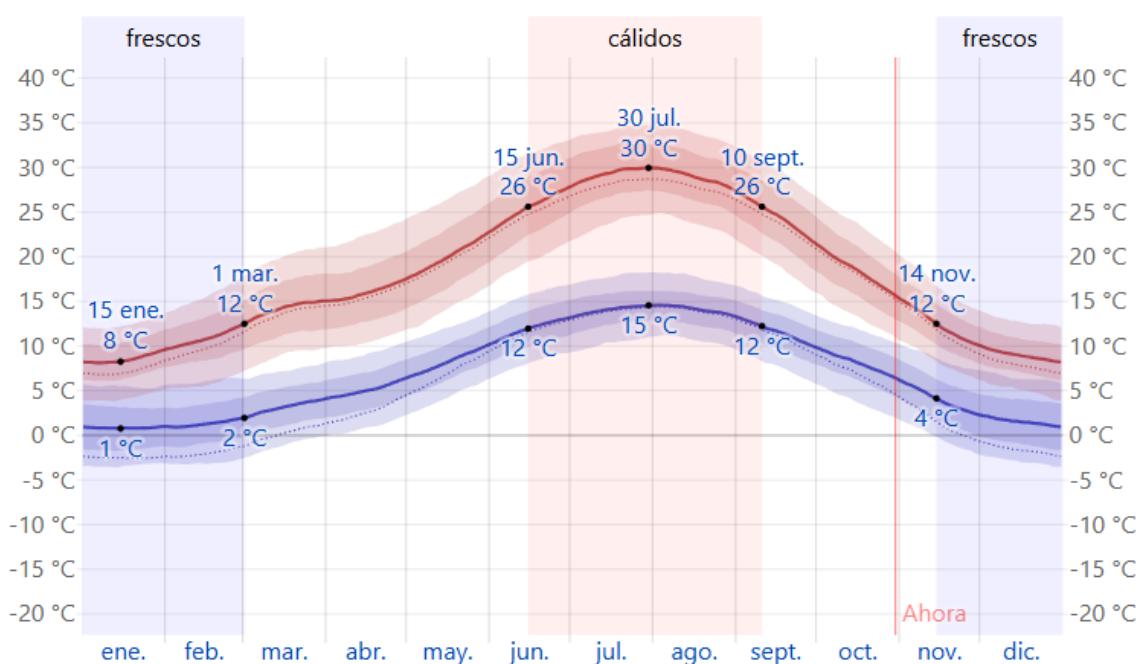
Stream	1	1'	2	3	4	Unit
Pressure	3.5	3.5	3.5	15	15	bar
Temperature	-9.53873	-9.53873	-9.53873	57.9632	43.8706	°C
Flow rate	45.3546	45.3546	45.3546	45.3546	45.3546	mol / s
Mole frac Propane	1	1	1	1	1	
Vapor phase						
Mole phase fraction	0.373935	0.373935	1	1	0	
Liquid phase						
Mole phase fraction	0.626065	0.626065	0		1	

Ilustración 37. Tabla de variables de corrientes del ciclo. COCO. Ciclo Simple.

En esta tabla se recogen las variables que debemos controlar a lo largo del ciclo para mantener un funcionamiento estable y controlado, se muestran la presión, la temperatura, el flujo (molar), la cantidad de compuestos que circulan (fracción molar) ya que puede haber mezclas, en este caso se utiliza un único compuesto para cada simulación (propano en el ejemplo) y por último, la fracción de vapor y de líquido que tiene la corriente, para controlar las entradas al compresor y al condensador y evaporador, maximizando el calor intercambiado (solo líquido en el evaporador, y solo vapor en el condensador) y evitando daños en el compresor, donde solo conviene que entre vapor. Todos estas variables se dan para cada corriente del circuito (stream), de modo que podemos seguir la evolución del fluido a lo largo del ciclo con total control sobre este.

Para realizar las **simulaciones del ciclo simple** se procede de la siguiente manera.

Lo primero es elegir una presión de baja para dimensionar la válvula de expansión de baja y tener el evaporador trabajando a una temperatura elegida como condición de contorno, en nuestro caso la imposición viene determinada por la temperatura exterior más baja que es posible alcanzar en el emplazamiento del sistema, como ejemplo del dimensionado se supone como emplazamiento Valladolid capital (España), donde buscando los datos climáticos de los últimos años se obtiene lo siguiente:



La temperatura máxima (línea roja) y la temperatura mínima (línea azul) promedio diaria con las bandas de los percentiles 25° a 75°, y 10° a 90°. Las líneas delgadas punteadas son las temperaturas promedio percibidas correspondientes.

Ilustración 38. Histórico clima temperatura externa en Valladolid (Weather Spark, 2024)

Donde escogiendo una temperatura en el evaporador situada en torno a -10 °C se asegura siempre que la temperatura exterior no disminuirá por debajo de este valor. Entonces esta temperatura hace necesario imponer la presión de baja del ciclo para que la temperatura de saturación sea de entorno -10 °C, que variará con cada refrigerante y cuyo valor se puede extraer de los diagramas h, T-s.

(cuando haya picos menor temperatura, que es ocasional se puede apoyar el suministro con agua caliente).

A continuación, se recogen los valores de la presión de baja para los distintos refrigerantes.

- **Propano (R290):** Presión de baja = 3.5 bar, Temperatura de saturación (Temperatura de evaporación) = -9.54 °C
- **Amoniaco (R717):** Presión de baja = 2.9 bar, Temperatura de saturación (Temperatura de evaporación) = -10.7 °C
- **Agua (R718):** Presión de baja = 0.75 bar, Temperatura de saturación ($T_{\text{evaporación}}$) = 92.3 °C
- **Pentano:** Presión de baja = 0.15 bar, Temperatura de saturación ($T_{\text{evaporación}}$) = -10.57 °C

El caso del Agua es distinto a los demás, pues no se puede tener una presión de baja razonable (valores superiores a 0.5 bar) con los que se consiga una temperatura en el evaporador de en torno a -10 °C. Para que esto ocurriese tendríamos que trabajar en la zona de baja presión con una presión prácticamente de vacío. Esto en la práctica no es algo en absoluto recomendable, pues trabajar en vacío lleva consigo mayores averías, así como montajes más caros y delicados. Por lo que este refrigerante es ideal para utilizarlo en los ciclos en cascada, que más adelante se detallan.

3.3.1.2. Ciclo compuesto

El segundo ciclo que se va a construir es el ciclo con compresión múltiple autoenfriada, para el cual se van a utilizar los siguientes elementos.

- Condensador.
- Evaporador.
- Compresor. (Uno de alta y otro de baja)
- Calculador.
- Control de caudal.
- Válvula de expansión.
- Unidad flash. (Para separar vapor y líquido).
- Mezclador.
- Corrientes de circuito, energía e información.

Este ciclo consiste en tres partes bien diferenciadas, la parte de baja presión que es donde se produce la evaporación del fluido, al salir del evaporador pasa por el compresor de baja, que eleva la presión hasta la presión intermedia del ciclo donde se produce la mezcla del vapor recirculado a esa misma presión para así aumentar

el rendimiento global del ciclo al aprovechar la energía de ese vapor y no perderla condensándolo. Además, se realiza una refrigeración intermedia al mezclar vapor de más baja temperatura, el recirculado, con vapor a más alta temperatura que es el que sale del compresor de baja. Tras pasar por el mezclador, aprovechando la energía del vapor recirculado y su menor temperatura para refrigerar la corriente total del vapor de salida, este se dirige a la segunda etapa de compresión, en el compresor de alta, el cual eleva la presión hasta el valor máximo de presión en el ciclo y después pasa por el condensador, en el cual se extrae calor a la temperatura determinada por la presión máxima.

Con este ciclo no se consigue aumentar la temperatura del calor extraído en el condensador, lo que se consigue es aumentar el rendimiento del ciclo al aprovechar una mayor parte de energía del vapor recirculado, la cual antes se perdía pues todo el vapor se laminaba hasta ser condensador en su mayor parte antes de pasar de nuevo por el evaporador.

A continuación, se muestra el esquema de ciclo con compresión múltiple elaborado en COCO.

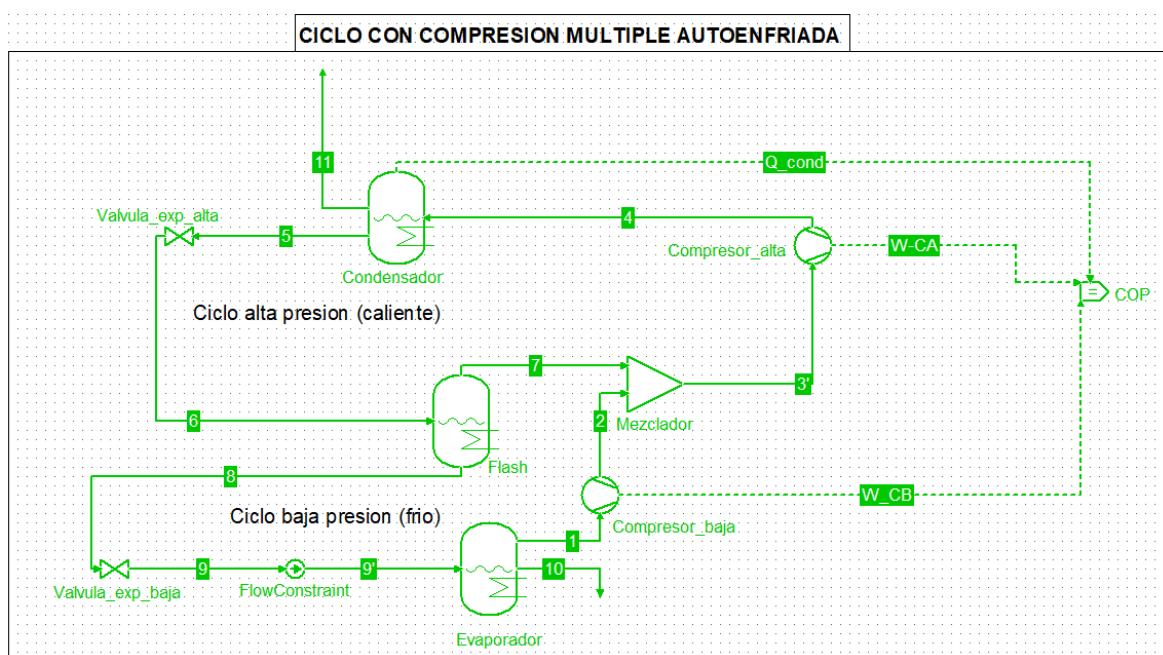


Ilustración 39. Esquema en COCO. Ciclo de compresión múltiple.

De nuevo, para todos los refrigerantes el ciclo es el mismo, en este caso también se han creado unas tablas donde podemos extraer condiciones de funcionamiento y resultados de la simulación.

A continuación se muestra la tabla de unidades de operación definidas para las simulaciones con este tipo de ciclo.

UO	Parameter	Value	Unit
Condensador	Heat duty	-305.846	kW
Evaporador	Heat duty	176.61	kW
Compresor_alta	Energy demand	19.5645	kW
Compresor_baja	Energy demand	109.672	kW
COP	output	2.36656	

Ilustración 41. Tabla de unidades de operación COCO. Ciclo con compresión múltiple.

Stream	1	2	3'	4	5	6	7	8	9	9'	Unit
Pressure	3.5	23	23	30	30	23	23	23	3.5	3.5	bar
Temperature	-9.53873	80.8241	76.9609	93.0892	77.3965	63.8113	63.8113	63.8113	-9.53873	-9.53873	°C
Flow rate	22.6773	22.6773	29.0969	29.0969	29.0969	29.0969	6.41964	22.6773	22.6773	22.6773	mol / s
Mole frac Propane	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Vapor phase											
Mole phase fraction	1	1	1	1	0	0.220629	1	0	0.546243	0.546243	
Liquid phase											
Mole phase fraction	0				1	0.779371	0	1	0.453757	0.453757	

Ilustración 40. Tabla de variables de corrientes del ciclo. COCO. Ciclo con compresión múltiple.

En estas tablas, al igual que para el ciclo simple, se recogen las variables que debemos controlar a lo largo del ciclo para mantener un funcionamiento estable y controlado, a diferencia de que en este caso hay un mayor número de corrientes, pero el fundamento es el mismo, poder controlar la evolución del fluido a lo largo del proceso para poder tomar las decisiones pertinentes en cada momento manteniendo un funcionamiento estable y seguro.

Para realizar las **simulaciones del ciclo con compresión múltiple autoenfriada** se procede de igual manera que en el ciclo simple, en cuanto a la selección de parámetros de presión de baja y presión máxima, siendo la presión intermedia un parámetro de optimización el cual se evalúa en los estudios paramétricos.

Los datos de presión de baja para cada fluido son los mismos que para el caso del ciclo simple.

- **Propano (R290).** Presión de baja = 3.5 bar, Temperatura de saturación (Temperatura de evaporación) = -9.54 °C
- **Amoniaco (R717).** Presión de baja = 2.9 bar, Temperatura de saturación (Temperatura de evaporación) = -10.7 °C
- **Agua (R718):** Presión de baja = 0.75 bar, Temperatura de saturación (Temperatura de evaporación) = 92.3 °C
- **Pentano.** Presión de baja = 0.15 bar, Temperatura de saturación (Temperatura de evaporación) = -10.57 °C

Y los datos de presión de alta se limitan con los puntos críticos de cada refrigerante, pero además teniendo en cuenta los resultados obtenidos para el ciclo simple, acotando la simulación a ese intervalo.

- **Propano (R290).** Presión de alta (máxima) = 40 bar.
- **Amoniaco (R717).** Presión de alta (máxima) = 44 bar.
- **Agua (R718).** Presión de alta (máxima) = 30 bar.
- **Pentano.** Presión de alta (máxima) = 30 bar.

3.3.1.3. Ciclo en cascada

El ciclo en cascada es el tercer tipo de ciclo que se va a simular. El objetivo es que a partir de una sucesión en serie con varios ciclos simples conseguir aumentar el nivel térmico del flujo extraído en el condensador. De manera que se consiga abarcar un mayor número de procesos industriales y aumentar el interés de la aplicación de este proyecto.

En cuanto a los elementos incluidos en el ciclo en cascada, se compone de los mismos que el ciclo simple. Se realizan modificaciones para un correcto funcionamiento.

- **Supresión del control de flujo en el ciclo en serie consecutivo.** Con objeto de poder converger al valor adecuado para su funcionamiento, en función de los parámetros del ciclo.
- **Se añade un intercambiador de calor,** que hace la función de evaporador del ciclo consecutivo y a su vez condensador del ciclo precedente. De esta manera la solución converge a un valor estable.

Por lo demás, son los mismos componentes que el ciclo simple.

El interés de este ciclo es poder utilizar distintos refrigerantes al mismo tiempo, pues los ciclos en serie se acoplan mediante un intercambiador, pero son independientes entre sí. Debido a esto podemos utilizar un refrigerante en el primer ciclo simple para llegar a un nivel térmico adecuado y con buen rendimiento para el refrigerante del siguiente ciclo, y de esta manera llegamos a un nivel térmico superior sin tener un salto tan grande de presión, y esto consigue un rendimiento global bueno.

A continuación, se muestra el esquema de ciclo con compresión múltiple elaborado en COCO.

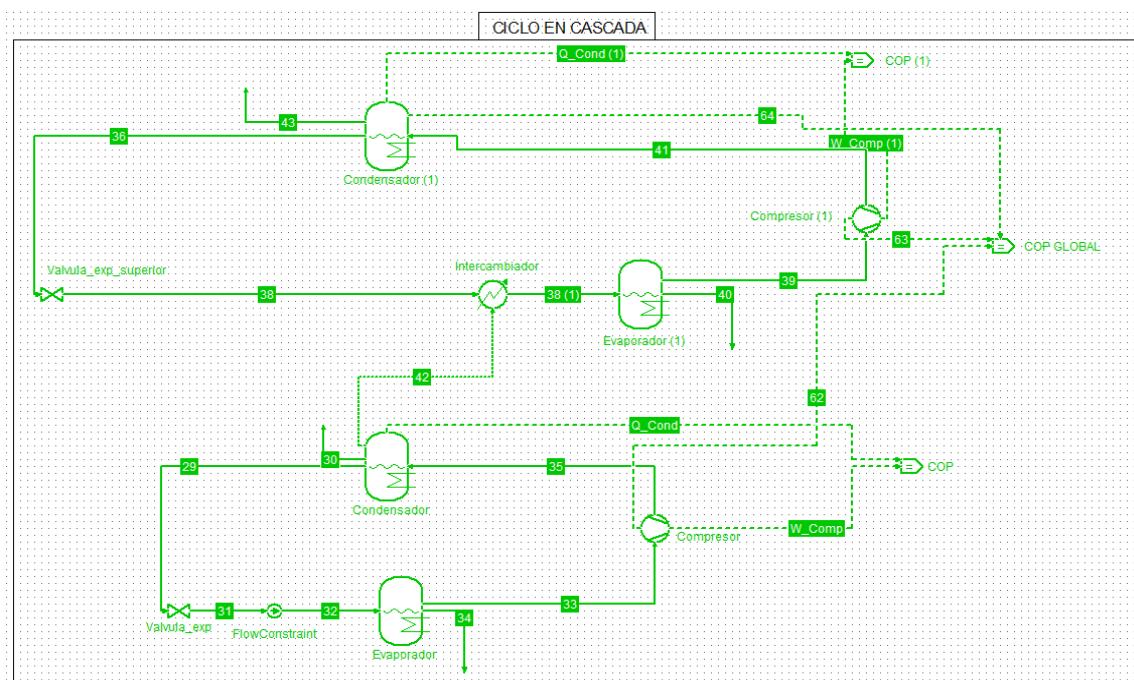


Ilustración 42. Esquema en COCO. Ciclo en cascada.

En este caso también se han creado unas tablas donde se pueden extraer condiciones de funcionamiento de cada parte de la instalación además de una tabla de información con las unidades de operación del ciclo resultado de cada simulación.

UO	Parameter	Value	Unit	CICLO SUPERIOR							
Condensador (1)	Heat duty	-2972	kW								
Evaporador (1)	Heat duty	0	kW								
Compresor (1)	Energy demand	1552.72	kW								
COP (1)	output	1.91408									
Stream	36	38	38 (1)	39	40	41	43	Unit			
Pressure	35	0.3	0.3	0.3	0.3	35	35	bar			
Temperature	241.93	71.0517	72.0804	72.0804	72.0804	893.569	241.93	°C			
Flow rate	49.8322	49.8322	49.8322	49.8322	0	49.8322	0	mol / s			
Mole frac Water	1	1	1	1	1	1	1				
Vapor phase											
Mole phase fraction		0.346032	1	1	1	1					
Liquid phase											
Mole phase fraction	1	0.653968							1		

Ilustración 43. Tabla de parámetros e información COCO. Ciclo en cascada (superior).

UO	Parameter	Value	Unit
Condensador	Heat duty	-1419.28	kW
Evaporador	Heat duty	858.984	kW
Compresor	Energy demand	560.295	kW
COP	output	2.53309	

CICLO INFERIOR

Stream	29	30	31	32	33	34	35	Unit
Pressure	40	40	2.8	2.8	2.8	2.8	40	bar
Temperature	78.1097	78.1097	-10.7895	-10.7895	-10.7895	-10.7895	254.973	°C
Flow rate	58.7181	0	58.7181	58.7181	58.7181	0	58.7181	mol / s
Mole frac Ammonia	1	1	1	1	1	1	1	
Vapor phase								
Mole phase fraction			0.354192	0.354192	1		1	
Liquid phase								
Mole phase fraction	1	1	0.645808	0.645808		1		

Ilustración 44. Tabla de parámetros e información COCO. Ciclo en cascada (inferior).

Como se puede ver se incluyen tantas tablas como ciclos haya en serie. En este caso solo se ha simulado con dos ciclos en serie, en el caso del ejemplo amoniaco en el inferior y agua en el superior.

Por último, se muestra una tabla de información de unidades de operación relevantes de cara a los resultados globales del ciclo en cascada.

UO	Parameter	Value	Unit
Condensador (1)	Heat duty	-2972	kW
Condensador (1)	Temperature	241.93	°C
Compresor (1)	Energy demand	1552.72	kW
Compresor	Energy demand	560.295	kW
COP GLOBAL	output	1.40652	

Ilustración 45. Tabla de parámetros globales COCO. Ciclo en cascada.

Resume los resultados considerados más relevantes del ciclo, calor absorbido, calor extraído, consumo energético de los compresores y el rendimiento global. Para realizar las **simulaciones del ciclo en cascada** se procede de igual manera que en el ciclo simple, en cuanto a la selección de parámetros de presión de baja y presión máxima, siendo la configuración del ciclo sucesivo una relación de compromiso entre nivel térmico y rendimiento. En este caso se configura el ciclo inferior (amoniaco) para maximizar su rendimiento, según los resultados obtenidos en las simulaciones anteriores. Después se escoge la configuración del ciclo superior (agua) para conseguir un salto térmico en el condensador/evaporador, intermedio, adecuado a las especificaciones habituales. Y, por último, la presión adecuada en el compresor para alcanzar el nivel térmico deseado, tratando también de optimizar el rendimiento global, mediante los estudios paramétricos.

3.2. – Resultados esperados de la simulación

Con las simulaciones se esperan obtener los resultados mostrados a continuación, a modo de ejemplo, simulando uno de los refrigerantes estudiados, el propano (R290).

En la gráfica se muestran las variables de mayor interés de cara al estudio de viabilidad para la aplicación de los distintos refrigerantes y comportamiento en los distintos tipo de ciclos modelados.

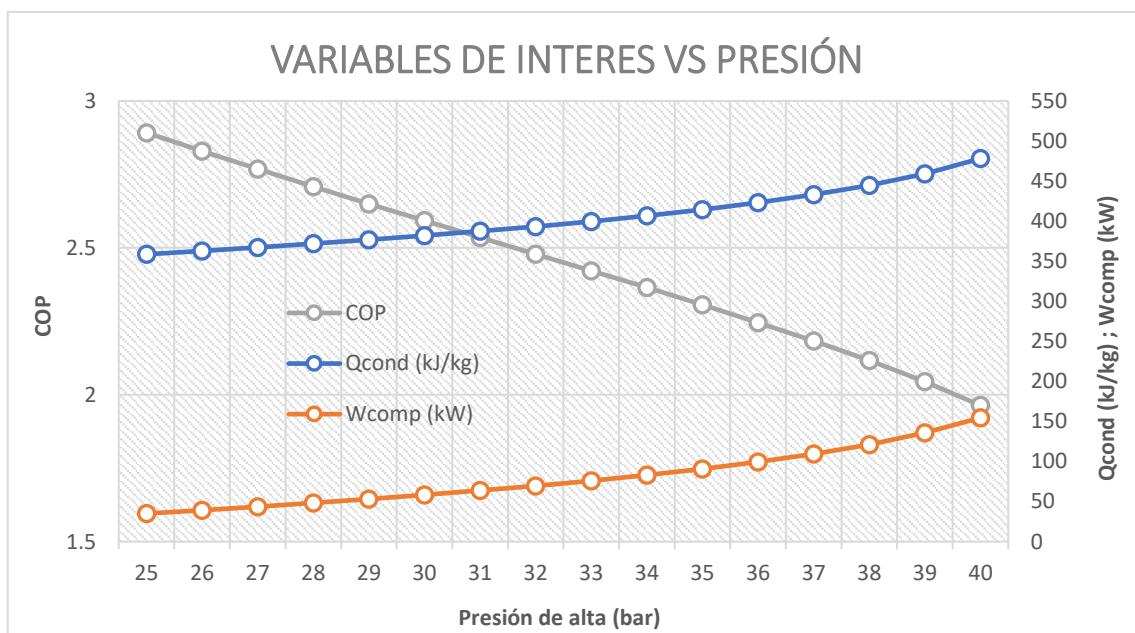


Ilustración 46. Variables de interés para la simulación.

En la simulación ejemplo mostrada se ha analizado la evolución de las variables de interés para el análisis del comportamiento de cada refrigerante de manera que se puedan sacar conclusiones de cara a la elección del tipo de ciclo y refrigerante más adecuado para cada aplicación.

Las variables analizadas son, el calor extraído en el condensador (Qcond, kJ/kg), el trabajo de compresión (Wcomp, kW) y rendimiento del ciclo (COP). Los resultados mostrados como ejemplo están extraídos de los resultados de la simulación con el propano, en el modelo de ciclo combinado, simulado en COCO.

Con estos resultados se podrán extraer conclusiones de idoneidad de los refrigerantes para su aplicación tras realizar las simulaciones oportunas, a su vez, comparar los distintos tipos de ciclo modelados. Y por último poder concluir si es viable o no la aplicación de este proyecto de manera justificada.

CAPITULO 4. Resultados COCO

4.0. – Hipótesis, asunciones y justificaciones

Para realizar las simulaciones con COCO, como modelo de cálculo se utiliza el balance energético y másico para cada componente y para la instalación completa (ciclo). Se utiliza la base de datos proporcionada por el propio programa. La cuál contiene todas las variables de estado para cada punto de operación bien definidas. Siendo esta la librería TEA-COCO, utilizada en aplicaciones termodinámicas de ingeniería, aunando todas las propiedades de sustancias químicas más habituales y con capacidad de cálculo con hasta 100 métodos diferentes con sus derivaciones analíticas y numéricas.

Para definir la manera de realizar los cálculos en el simulador, se ha seleccionado la ecuación de estado termodinámica de Peng Robinson, así se determinan las propiedades de los fluidos en cada simulación.

Se ha definido para las simulaciones el comportamiento real de los fluidos, no modelos idealizados ni simplificados, así se maximiza la similitud al comportamiento en el caso real.

4.1. – Estudios paramétricos, optimización

Para poder optimizar los parámetros de los ciclos acorde a sus condiciones de contorno se realizan estudios paramétricos donde se van modificando variables como la presión de salida del compresor y obtener como resultado distintas situaciones en las que varía el COP, la temperatura del condensador, el calor extraído del ciclo, para así poder escoger los parámetros idóneos de funcionamiento de los ciclos para cada refrigerante acorde a los resultados que queremos obtener, un COP elevado y una temperatura en el condensador adecuada para el proceso al que se aplica el ciclo.

4.1.1. – Ciclo simple

Para el ciclo simple se realizará un estudio paramétrico variando la presión de alta, la de salida del compresor, manteniendo la presión de baja en el valor requerido por cada refrigerante para obtener la temperatura en el evaporador establecida. Estos son los valores para cada refrigerante, antes mencionados:

- **Propano (R290).** Presión de baja = 3.5 bar, Temperatura de saturación (Temperatura de evaporación) = -9.54 °C
- **Amoniaco (R717).** Presión de baja = 2.9 bar, Temperatura de saturación (Temperatura de evaporación) = -10.7 °C
- **Agua (R718).** Presión de baja = 0.75 bar, Temperatura de saturación (Temperatura de evaporación) = 92.3 °C
- **Pentano.** Presión de baja = 0.15 bar, Temperatura de saturación (Temperatura de evaporación) = -10.57 °C

A continuación, se muestra la manera de proceder para hacer el estudio paramétrico.

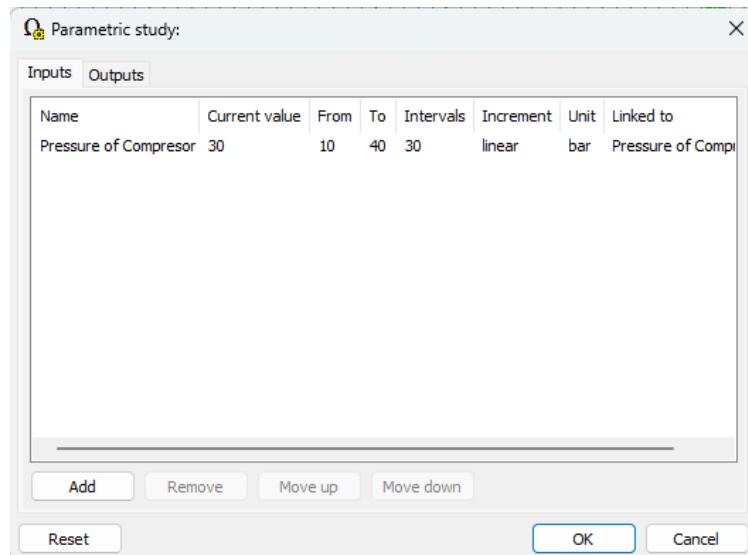


Ilustración 47. Entradas para el estudio paramétrico. Ciclo Simple.

En la ilustración anterior se muestran los inputs del estudio paramétrico, a modo de ejemplo, en la imagen se muestra el estudio para el propano. La presión del compresor varía entre 10 y 40 bar, en intervalos de 1 bar, dando como resultado 30 iteraciones en las que se muestran las outputs establecidas para cada iteración. A continuación, se muestran las outputs.

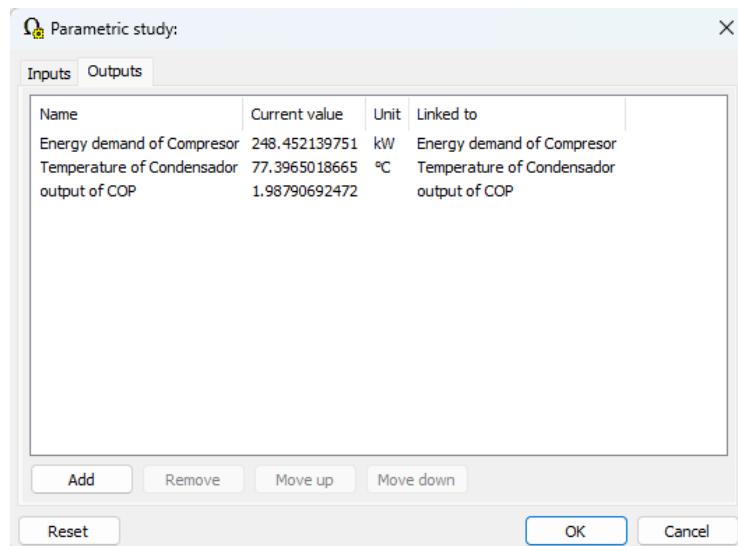


Ilustración 48. Salidas para el estudio paramétrico. Ciclo simple.

En la ilustración anterior se muestran los outputs del estudio paramétrico. Estas variables son de interés común a todos los refrigerantes. Son la demanda del compresor, la temperatura del condensador (la necesaria para cada proceso al que aplica) y el rendimiento del ciclo (COP).

Hay que tener en cuenta los puntos críticos de los refrigerantes utilizados en las simulaciones para determinar el rango de operación, pues la presión máxima a la que puede operar cada refrigerante viene dada por su punto crítico y aunque en la práctica trabajaremos lejos de este, es interesante tomarlo como límite en los estudios paramétricos para obtener el comportamiento en todo sus rangos de funcionamiento.

En la tabla que se muestra a continuación se recogen sus valores de presión y temperatura máximas obtenidas en la simulación para cada refrigerante.

Tabla 4. Tabla resumen puntos críticos refrigerantes.

PUNTOS CRITICOS	Presión (bar)	Temperatura (°C)
Propano	42.5	96.85
Amoniaco	116	133.85
Agua	220	373.85
Pentano	32.5	193.85

Viendo hasta que temperatura podemos llegar con cada refrigerante, se ha definido el intervalo de simulación para los estudios paramétricos que se han realizado con cada refrigerante.

Tabla 5. Tabla intervalos de simulación para estudio paramétrico. Ciclo simple.

REFRIGERANTES	Presión válvula de expansión (bar)	Presión de compresión (bar)
Propano	3.5	10 a 40
Amoniaco	2.8	15 a 108
Agua	0.75	10 a 30
Pentano	0.15	2 a 30

Los resultados obtenidos se muestran a continuación, de manera individual para cada refrigerante.

Propano (R290)

Consumo de compresor (kW)

En esta gráfica se muestra la evolución del consumo del compresor (en kW) en función de la presión de compresión.

Como es lógico, este aumenta conforme aumenta la presión, pues el trabajo de compresión aumenta, pero se observa que a alta presión la pendiente es menos pronunciada.

Esto puede penalizar menos el rendimiento al movernos por valores altos de presión.

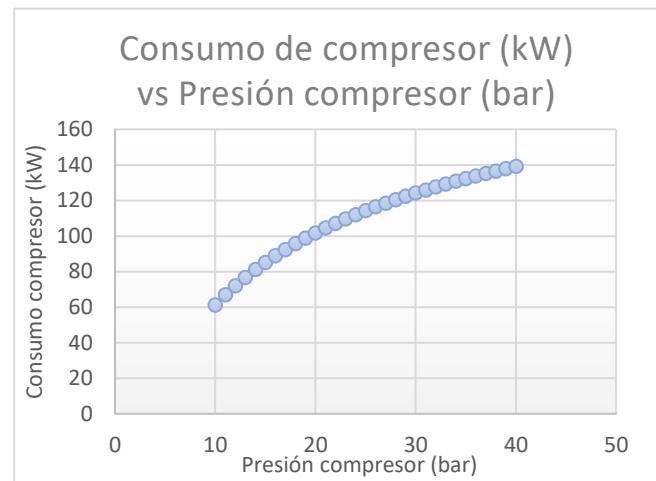


Ilustración 49. Evolución consumo de compresor frente a la presión. Ciclo simple. Propano.

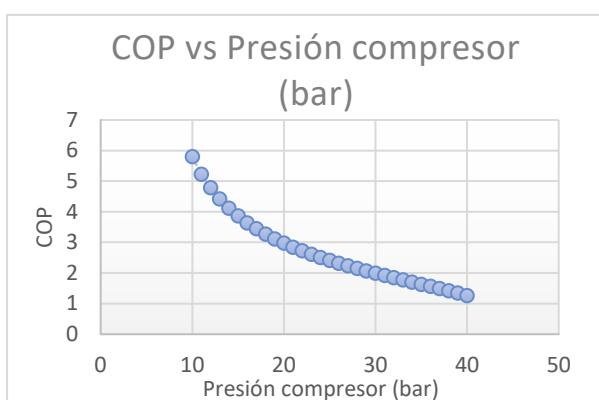


Ilustración 50. Evolución COP (Rendimiento)

En esta gráfica se observa la evolución del COP frente a la temperatura en el condensador. Esta es una variable muy de nuestro interés teniendo en cuenta que la temperatura del condensador es a la que se intercambia calor en este, por lo que es la temperatura demandada por el proceso al que se aplica.

Rendimiento del ciclo, COP

En esta gráfica se observa la evolución del rendimiento del ciclo, el COP, donde se ve como conforme aumenta la presión de compresión el COP es menor.

Tiene una tendencia decreciente donde para presiones altas la curva es más tendida.

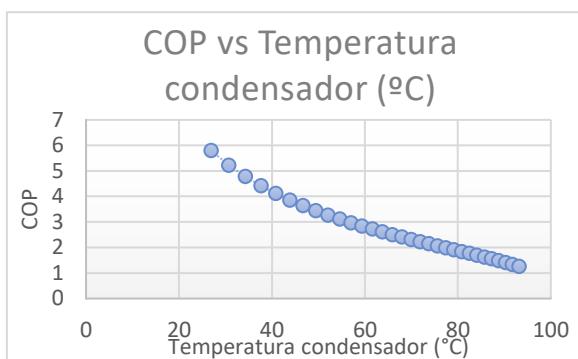


Ilustración 51. Evolución COP (Rendimiento) frente a la temperatura del condensador. Ciclo simple. Propano.

Temperatura condensador (°C)

En esta gráfica se observa la evolución creciente de la temperatura en el condensador con la presión de compresión.

Esto se debe a que, al aumentar la presión alcanzada, nos desplazamos hacia arriba en la curva de saturación, aumentando la temperatura a la que se produce el cambio de fase.

A la vista de este resultado se plantea una relación de compromiso entre la temperatura en el condensador y el COP del ciclo, pues tienen comportamientos opuestos frente a la evolución de la relación de compresión.

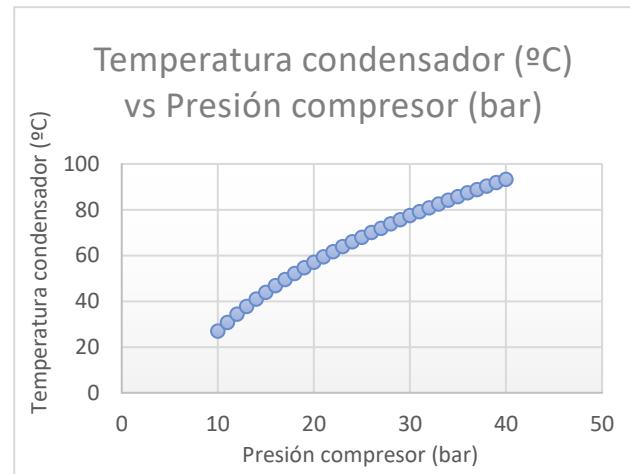


Ilustración 52. Evolución de la temperatura del condensador frente a la presión. Ciclo simple. Propano.

Flujo de calor condensador (kJ/s)

Esta gráfica muestra la evolución del calor intercambiado en el condensador, por unidad de masa, que como se puede apreciar tiene una evolución decreciente con el aumento de la presión de compresión, aunque la pendiente no es muy pronunciada y su valor oscila entre los 350 y los 175 kJ/s para todo el rango de presiones (10 a 40 bar).

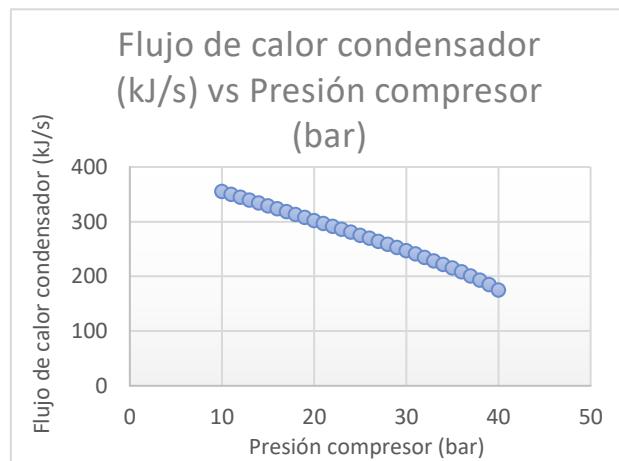


Ilustración 53. Evolución flujo de calor del condensador frente a presión. Ciclo simple. Propano.

Analizando los resultados de este refrigerante, se pueden destacar los siguientes aspectos.

- Para una relación de compresión baja, obtenemos un buen COP, 10 bar – 5.8 COP, pero sin embargo la temperatura de condensación es de 29 °C, y realmente no es aplicable a ningún proceso, por lo que este punto carece de interés.
- Se puede conseguir una temperatura máxima en el condensador de 93 °C aproximadamente, para 40 bar, lo cual ya es más interesante, pues algunos procesos industriales si se encuentran en ese nivel térmico, sin embargo, es el punto de menor rendimiento, con un COP de 1.26, lo cual indica que obtenemos 1,26 kW térmicos por cada kW eléctrico consumido, es un COP bajo, pero no penaliza.
- Lo ideal es buscar un término medio, tener un buen COP para una temperatura en el condensador adecuada aplicable a procesos. Si vamos al punto de 32 bar, la temperatura en el condensador pasa a ser de 80 °C, y el COP aumenta hasta 1.84.

Amoniaco (R717)

Consumo de compresor (kW)

En esta gráfica vemos la evolución del consumo del compresor en función de la presión de compresión, aumenta conforme aumenta la presión, pues el trabajo de compresión aumenta.

Tiene una tendencia a pendiente más horizontal para altas presiones.

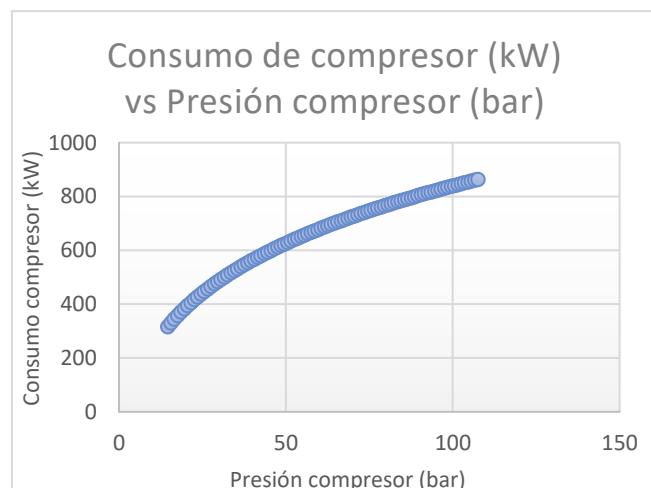


Ilustración 54. Evolución consumo de compresor frente a la presión. Ciclo simple. Amoniaco.

Rendimiento del ciclo, COP

En este caso, con el Amoniaco el rango de presiones es mucho mayor, además el COP se mantiene elevado a presiones más altas. Siendo máximo para 15 bar, con un valor de $COP = 4.44$. Su tendencia es decreciente con el aumento de la presión, hasta un mínimo de $COP = 1.424$ para 108 bar.

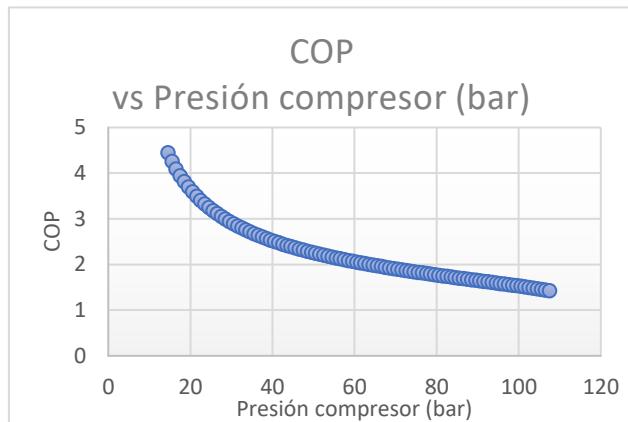


Ilustración 55. Evolución COP (Rendimiento) frente a la presión. Ciclo simple. Amoniaco.

Esta gráfica muestra la evolución del COP con el aumento de la temperatura del condensador, siendo este decreciente con la misma. Como se puede ver se aunque la tendencia con la presión sea similar, se obtienen temperaturas más elevadas que en el caso del propano, esto permite su aplicación en procesos de un nivel térmico superior.

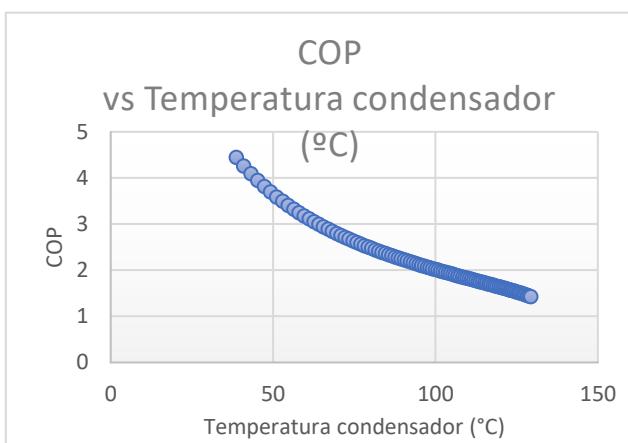


Ilustración 56. Evolución COP (Rendimiento) frente a la temperatura del condensador. Ciclo simple. Amoniaco.

Temperatura condensador (°C)

Aquí podemos ver como conforme aumenta la compresión de alta, la temperatura en el condensador también, al igual que en el propano y por el mismo motivo, nos desplazamos hacia arriba en la curva de saturación aumentando la temperatura de cambio de fase. Llegando a alcanzar los 130°C para una presión de 108 bar.

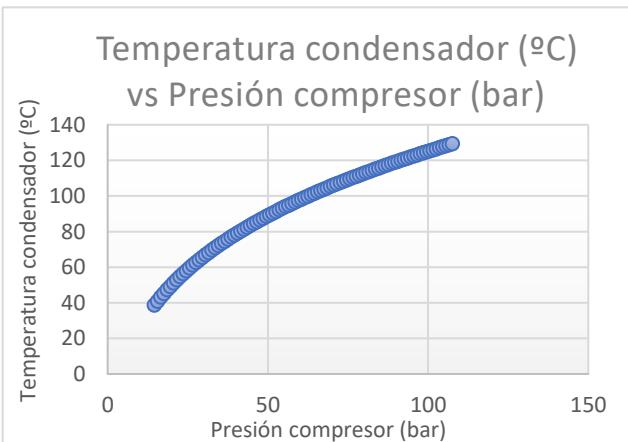


Ilustración 57. Evolución COP (Rendimiento) frente a la temperatura del condensador. Ciclo simple. Amoniaco.

Flujo de calor condensador (kJ/s)

En esta gráfica se puede observar un comportamiento diferente, el flujo de calor del condensador primero aumenta con la relación de compresión, hasta alcanzar un máximo para una presión de 30 bar, y después disminuir con el aumento de esta. Oscilando en un rango de entre 1425 y 1225 kW, para el rango de presiones 15 a 108 bar.

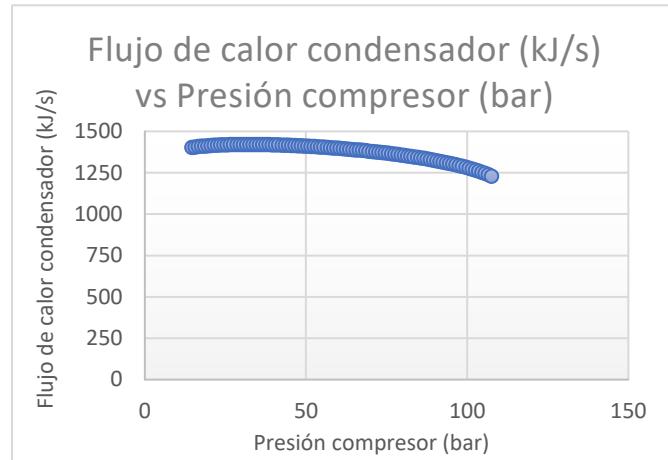


Ilustración 58. Evolución flujo de calor del condensador frente a presión. Ciclo simple. Amoniaco.

Analizando los resultados de este refrigerante se pueden destacar los siguientes aspectos.

- Es importante tener en cuenta la relación de compromiso entre temperatura del condensador y el COP del ciclo, pues cuanta más temperatura se demanda menor es el COP, y para que la solución sea viable tiene que poder aplicarse a procesos en los que tenga un buen COP, un buen criterio podría establecer un COP mayor a 2.
- Se puede conseguir una temperatura máxima en el condensador de 130 °C aproximadamente, para 108 bar, es un valor muy interesante pues aplica a una gran cantidad de procesos de medio/bajo nivel térmico, sin embargo, es el punto de menor rendimiento, con un COP de 1.424, y además la presión es muy elevada para una aplicación común, por ello no es una solución realmente viable.
- Lo ideal es buscar un término medio, tener un buen COP para una temperatura en el condensador adecuada aplicable a procesos. Si vamos al punto de 62 bar de presión de alta, la temperatura en el condensador pasa a ser de 100 °C, y el COP aumenta hasta 2. Esto ya es más interesante, pues es aplicable en la realidad, tiene buen rendimiento y se alcanza una temperatura que abarca gran cantidad de procesos de bajo nivel térmico, lo que supone un gran ahorro energético y económico. Además, el flujo de calor por unidad de masa se encuentra cerca del máximo, con valor de 1400 kJ/s aproximadamente.

Aqua (R718)

Consumo de compresor (kW)

En esta gráfica vemos la evolución del consumo del compresor, función de la presión de compresión, y al igual que en los otros casos, aumenta conforme aumenta la presión, pues el trabajo de compresión requerido es mayor. Se tiende a una pendiente menor conforme aumenta la presión.

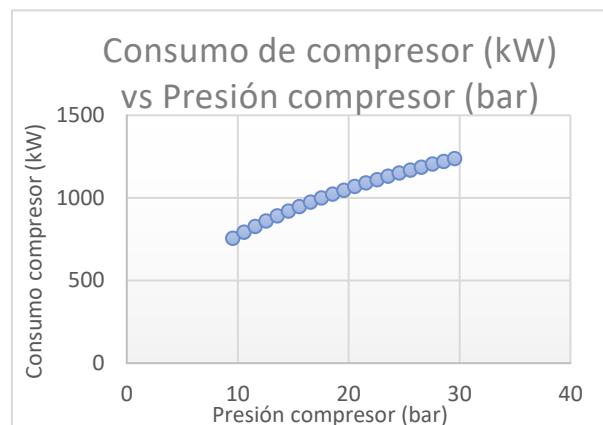


Ilustración 59. Evolución consumo de compresor frente a la presión. Ciclo simple. Agua.

Rendimiento del ciclo, COP

En esta gráfica se puede ver cómo afecta al rendimiento del ciclo (COP) el aumento de la presión del compresor. El rendimiento disminuye conforme aumenta la presión del compresor, esto ocurre debido a que el trabajo de compresión aumenta en mayor medida que el calor obtenido en el condensador.

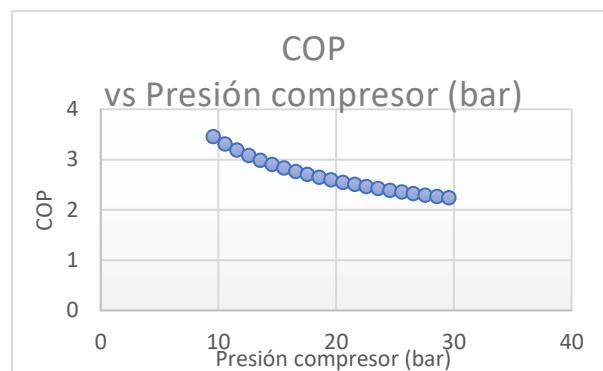


Ilustración 60. Evolución COP (Rendimiento) frente a la presión. Ciclo simple. Agua.

En esta gráfica se puede ver la evolución del rendimiento del ciclo conforme aumenta la temperatura en el condensador, el cual se ve minorado con el aumento de la temperatura, pues el aumento de trabajo de compresión aumenta en mayor medida, pero una condición de contorno muy importante y fundamental como ya se ha visto es la temperatura de condensación, pues esta temperatura es la que tiene que ser suficiente para aplicar a un determinado proceso, y surge la relación de compromiso entre el COP y la temperatura de condensación.

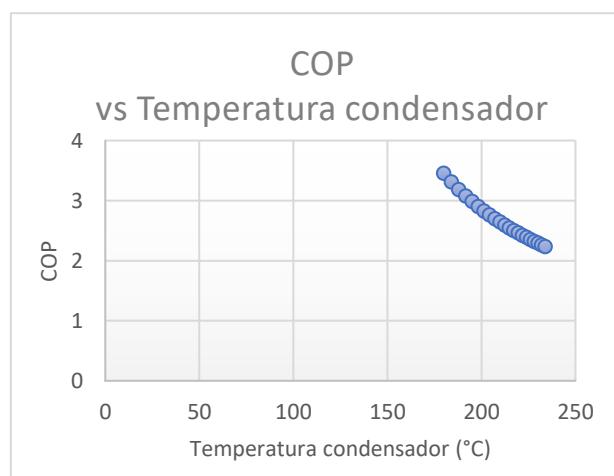


Ilustración 61. Evolución COP (Rendimiento) frente a la temperatura del condensador. Ciclo simple. Agua.

Siendo un COP bastante bueno en todo el rango de presiones simulado, pues su valor oscila entre 3.45 y 2.3, lo cual se traduce como un gran rendimiento pues conviertes cada parte eléctrica en como mínimo 2.3 partes de energía térmica.

Temperatura condensador (°C)

De igual modo que para los otros fluidos, conforme aumentamos la presión del compresor la temperatura de condensación también aumenta, como ya se ha explicado, debido a que nos desplazamos a zonas superiores en la curva de saturación del fluido, donde la temperatura de saturación aumenta con la presión.

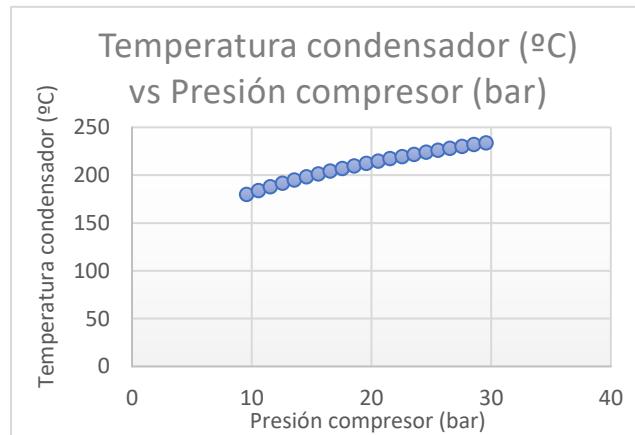


Ilustración 62. Evolución de la temperatura del condensador frente a la presión. Ciclo simple. Agua.

El punto fuerte del agua como fluido refrigerante es que se pueden alcanzar altas temperaturas para no muy altas presiones, como se puede ver, la temperatura mínima de condensación es de 180 °C, y se da para tan solo 9 bar, y siendo la temperatura de condensación máxima alcanzable de 234 °C, lo cual engloba cualquier proceso de baja y media temperatura, por lo que es de mucho interés su aplicación a estos procesos.

Flujo de calor condensador (kJ/s)

El flujo de calor por unidad de masa en el condensador aumenta conforme lo hace la presión del compresor, esto se relaciona directamente con la temperatura de saturación, mayor cuanto mayor es la presión, esto es lógico, pues al aumentar la presión máxima aumentamos también el nivel térmico. También es destacable que el flujo de calor es notoriamente superior en el agua frente a otros refrigerantes, oscilando entre 2600 y 2770 kJ/s para el rango de presiones establecido.

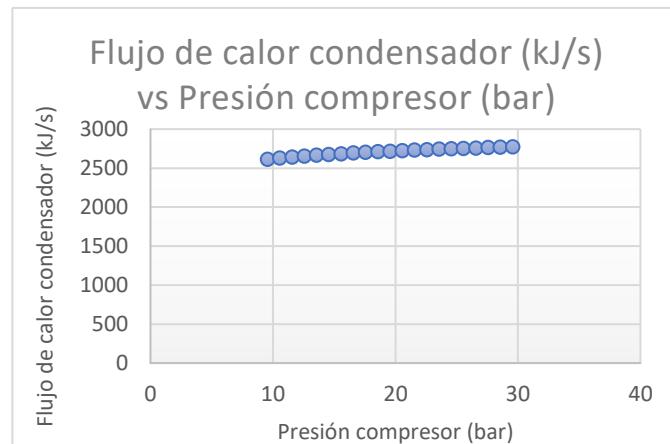


Ilustración 63. Evolución flujo de calor del condensador frente a presión. Ciclo simple. Agua.

Analizando los resultados de este refrigerante se pueden destacar los siguientes aspectos.

- Al igual que en los otros casos es importante tener en cuenta la relación de compromiso entre temperatura del condensador y el COP del ciclo, en este caso hay que buscar un buen rendimiento para un determinado proceso con un nivel térmico adecuado. En este caso el COP mínimo es de 2.3 y se da para 28 bar, presión máxima simulada, con la que se consigue un nivel térmico de 2770 kW a 234 °C. Esto es muy interesante porque a pesar de que este es el punto más desfavorable desde el punto de vista del rendimiento sigue siendo un valor bueno y razonable, además de que con este nivel térmico podemos aplicar a prácticamente cualquier proceso de media y baja temperatura con un buen flujo de calor sin tener que trabajar con una presión demasiado elevada.
- La única problemática del agua es que para poder trabajar con una presión de baja razonable (que sea adecuada para llevar a la práctica y no de prácticamente el vacío) debemos tener una temperatura en el evaporador de 93 °C, muy superior a la de cualquier ambiente. Que se haya elegido esta temperatura no es casualidad, pues el interés del agua radica en su aplicación en otro ciclo que más adelante se explica, y los 93 °C en el evaporador se han escogido precisamente porque con todos los demás fluidos se puede conseguir una temperatura en el condensador de 93 °C con un rendimiento asequible, esto aplica a ciclos en cascada como más adelante se detallará

Pentano

Consumo de compresor (kW)

Al igual que en los otros casos vemos una evolución del consumo del compresor creciente con la presión de compresión, pues el trabajo de compresión requerido es mayor. En este caso la tendencia a un consumo más constante con el aumento de la presión es más notoria a altas presiones, siendo prácticamente una asíntota horizontal a partir de 20 bar.

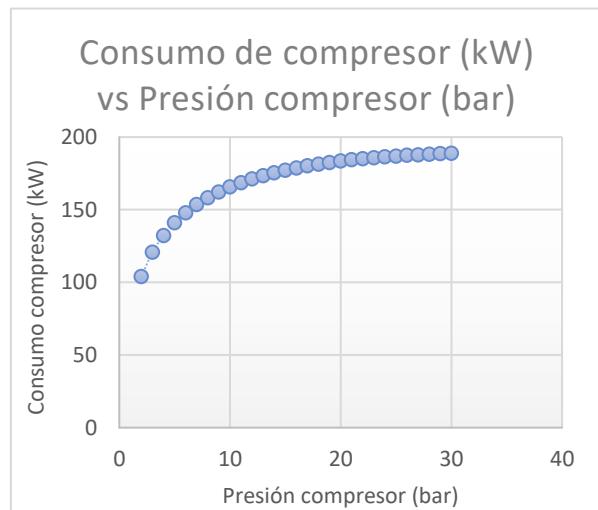


Ilustración 64. Evolución consumo de compresor frente a la presión. Ciclo simple. Pentano.

Rendimiento del ciclo, COP

El rendimiento del ciclo (COP) disminuye conforme aumenta la presión del compresor, esto ocurre, al igual que en los otros casos, debido a que el trabajo de compresión aumenta en mayor medida que el calor obtenido en el condensador. En este caso el COP menor a 1.5 carece de interés por lo que solo se considera un rango útil de presión de compresión comprendido entre 2 y 10 bar, por encima de 10 bar se obtiene un rendimiento pésimo el cual carece de interés.

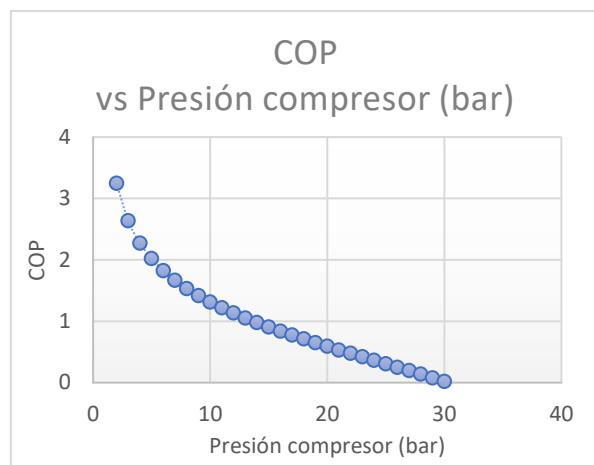


Ilustración 65. Evolución COP (Rendimiento) frente a la presión. Ciclo simple. Pentano.

En la gráfica se puede ver la evolución del rendimiento del ciclo conforme aumenta la presión de compresión, siendo el COP decreciente con el aumento de esta, al igual que en otros casos debido a que el trabajo de compresión aumenta en mayor medida que el calor obtenido en el condensador.

Al igual que se ha explicado en la gráfica anterior, el COP menor a 1.5 carece de interés por lo que solo se considera un rango aplicable de temperaturas en el condensador comprendido entre 60 y 120 °C, por encima de 120 °C se obtiene un rendimiento pésimo el cual carece de interés, y en este caso 120 °C se considera una temperatura de interés para su aplicación en procesos de baja y alguno de media temperatura.

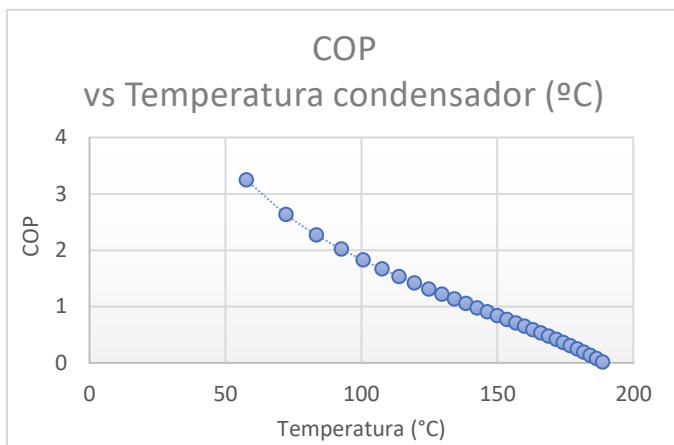


Ilustración 66. Evolución COP (Rendimiento) frente a la temperatura del condensador. Ciclo simple. Pentano.

Temperatura condensador (°C)

Conforme aumentamos la presión del compresor la temperatura de condensación también aumenta, y de nuevo como en los otros casos esto es debido a que nos desplazamos a zonas superiores en la curva de saturación del fluido, donde la temperatura de saturación aumenta con la presión.

Temperatura condensador (°C) vs Presión compresor (bar)

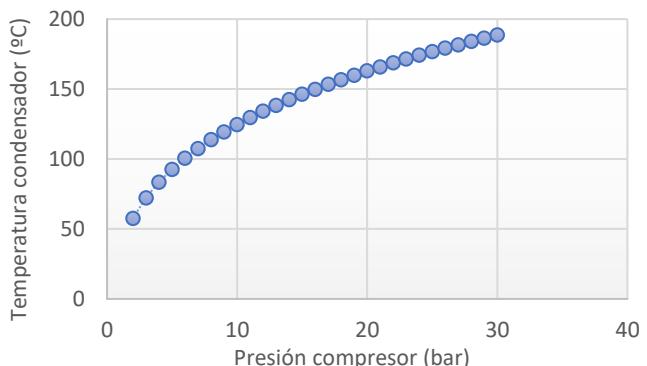


Ilustración 67. Evolución de la temperatura del condensador frente a la presión. Ciclo simple. Pentano.

Se puede destacar que, en el rango de temperaturas en el condensador comentado en la gráfica anterior, estamos trabajando dentro de un rango de presiones que se puede aplicar sin problemas en la realidad, pues no son presiones excesivas.

Flujo de calor condensador (kJ/s)

El flujo de calor por unidad de masa en el condensador aumenta conforme lo hace la presión del compresor, al aumentar la presión máxima aumentamos también el nivel térmico en el que se trabaja.

Con él pentano, el rango de flujos del calor en el rango de presiones de operación establecido por el COP (2 a 10 bar) oscila entre 220 y 340 kJ/s, es un valor muy inferior a los otros fluidos debido al bajo calor latente del pentano, siendo por unidad de masa bastaría con aumentar el flujo masico hasta alcanzar el flujo térmico requerido.

Flujo de calor condensador (kJ/s) vs Presión compresor (bar)

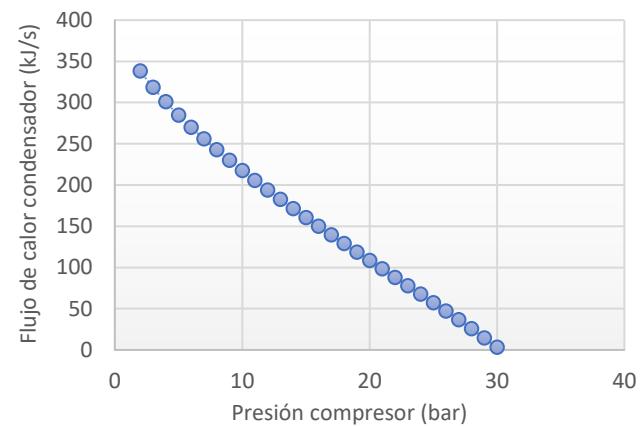


Ilustración 68. Evolución flujo de calor del condensador frente a presión. Ciclo simple. Pentano.

Analizando los resultados de este refrigerante se pueden destacar los siguientes aspectos.

- En el Pentano se puede destacar un rendimiento razonable para un rango de presiones establecido: presión mínima de 2 bar con un COP de 3.25 pero una baja temperatura de condensación (60 °C) y una presión máxima de 10 bar con un COP de 1.32 y una temperatura de condensación de 120 °C, aquí surge la relación de compromiso entre el COP y la temperatura de condensación, y destacando un rango de presiones con una presión máxima baja y que se puede llevar a la práctica con buen resultado.
- Debido al bajo flujo de calor transmitido en el condensador y al bajo rendimiento para una temperatura de condensación razonable, este fluido tiene poco interés para su uso de manera independiente, sin embargo, se puede utilizar para otro tipo de ciclos como se ve más adelante.

4.1.2. – Ciclo compuesto

Para el ciclo compuesto se realizará un estudio paramétrico variando la presión de alta y manteniendo la presión de baja en el valor requerido por cada refrigerante para obtener la temperatura en el evaporador establecida.

En este caso, tenemos más variables que en el caso simple, pero para realizar el estudio fijaremos todos los parámetros del ciclo con los que se obtiene el máximo rendimiento y solo variar la presión del compresor de alta en un intervalo donde se puede analizar temperatura en el condensador y rendimiento del ciclo.

Estos son los inputs del estudio, donde se puede ver el intervalo de la presión del compresor de alta del estudio paramétrico.

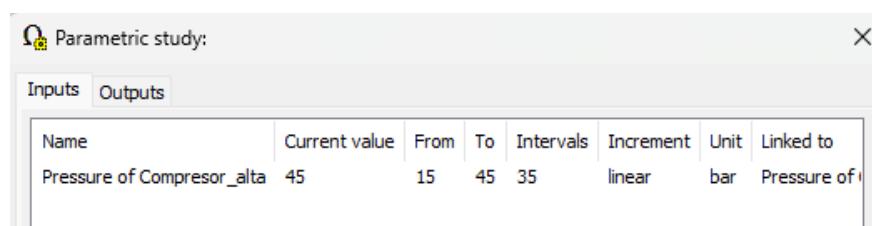


Ilustración 69. Entradas. Estudio paramétrico. Ciclo compuesto.

Y estos son los outputs, donde se muestran todos los parámetros relevantes para el análisis de resultados.

Name	Current value	Unit	Linked to
Pressure of Valvula_exp_baja	0.75	bar	Pressure of Valvula_exp_baja
Pressure of Valvula_exp_alta	4	bar	Pressure of Valvula_exp_alta
Pressure of Compresor_baja	4	bar	Pressure of Compresor_baja
Pressure of Compresor_alta	45	bar	Pressure of Compresor_alta
Energy demand of Compresor_alta	1362.2732855	kW	Energy demand of Compresor_alta
Energy demand of Compresor_baja	432.638623142	kW	Energy demand of Compresor_baja
Temperature of Condensador	256.674586107	°C	Temperature of Condensador
output of COP	2.17930308965		output of COP
Heat duty of Condensador	-3911657.06815	W	Heat duty of Condensador

Ilustración 70. Salidas. Estudio paramétrico. Ciclo compuesto.

La elección de los parámetros del ciclo se rige para obtener el máximo rendimiento posible. Por ello, mediante iteraciones, se han fijado los valores de presión intermedia (Válvula de expansión de alta y compresor de baja) para los cuales el rendimiento es máximo.

Después, a través de los estudios paramétricos se varía la presión del compresor de alta en un intervalo, establecido acorde a la presión máxima aplicable al ciclo para cada refrigerante.

Al igual que en los otros ciclos surge la relación de compromiso entre temperatura máxima en el condensador y rendimiento del ciclo. Con todo esto, los parámetros para realizar los estudios paramétricos, para cada refrigerante, son los siguientes:

Tabla 6. Intervalos de simulación para distintos refrigerantes. Ciclo compuesto.

REFRIGERANTES	Presión válvula de expansión (bar)	Presión de compresión intermedia y válvula de expansión de alta (bar)	Presión de compresión de alta (bar)
Propano	3.5	16 a 23	25 a 40
Amoniaco	2.8	10 a 44	54 a 108
Agua	0.75	3 a 9	15 a 45
Pentano	0.2	1.25 (Óptimo)	5 a 16

Los resultados obtenidos se muestran a continuación, de manera individual para cada refrigerante y así poder ver el comportamiento de cada refrigerante por separado.

Para las simulaciones se han realizado varias iteraciones variando la presión intermedia, compresor de baja y válvula de expansión de alta. De manera que para cada presión se itera la presión de compresión de alta en el intervalo establecido. Pudiendo así realizar la optimización de parámetros para maximizar el rendimiento a una temperatura en el condensador determinada.

Estos intervalos son los más adecuados para el funcionamiento, pues es un intervalo donde la temperatura del condensador es adecuada para su aplicación en procesos y se mantiene un buen rendimiento.

En cuanto a los resultados obtenidos para cada refrigerante, se puede ver como el comportamiento en el ciclo compuesto es igual al del ciclo simple, a diferencia de que con el ciclo compuesto el rendimiento es superior en todos los casos.

Propano (R290)

La evolución del consumo del compresor de alta es creciente, de manera exponencial, con el aumento de la relación de compresión, como es lógico, pues el trabajo de compresión necesario aumenta.

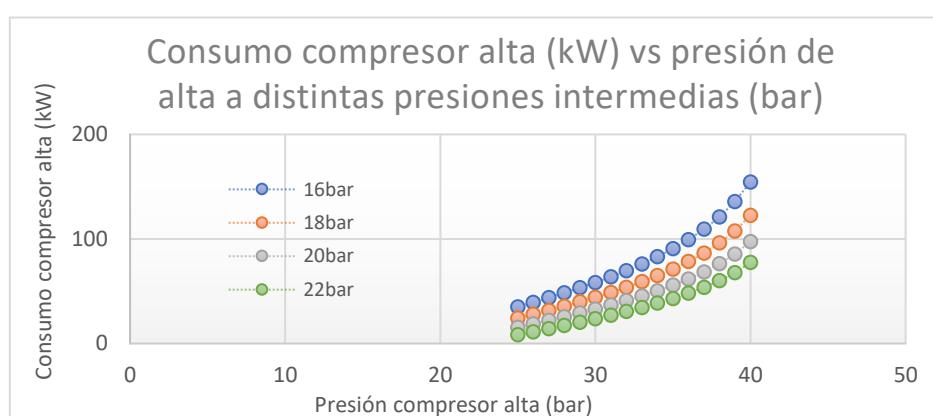


Ilustración 71. Evolución consumo de compresor frente a la presión. Ciclo compuesto. Propano.

En la gráfica se muestran distintas simulaciones variando el punto intermedio de presión, es decir, distintas presiones para el compresor de baja, de manera que el salto necesario para alcanzar la presión máxima del ciclo es más reducido y se reparte entre las dos etapas de compresión. Por ello, el consumo del compresor de alta es menor conforme aumenta la relación de compresión del compresor de baja. Si que es cierto que el consumo del compresor de baja aumenta, pero más adelante se verá en el rendimiento del ciclo que efecto tiene modificar el valor de presión intermedia.

En esta gráfica se muestra la evolución del rendimiento del ciclo conforme aumenta la relación de compresión del compresor de alta, además de distintas series simulando con distintas presiones intermedias y así poder ver el efecto que tiene sobre el mismo modificar el valor intermedio de presión.

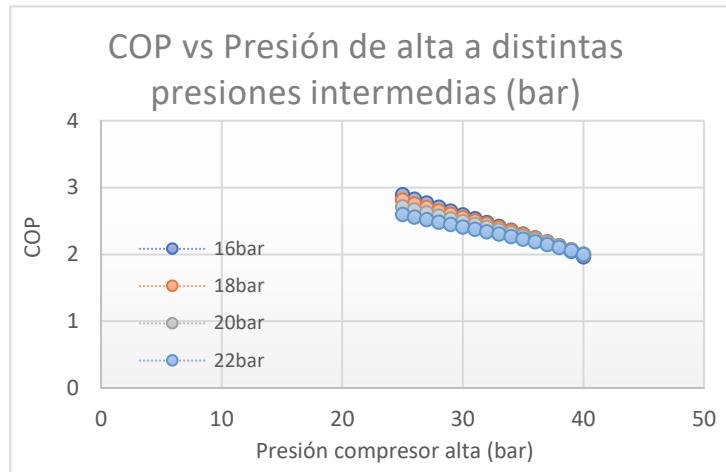


Ilustración 72. Evolución COP (Rendimiento) frente a la presión. Ciclo compuesto. Propano

Analizando los resultados se puede observar que el rendimiento es decreciente conforme aumenta la presión y que, para bajas presiones de alta, el rendimiento es máximo con el valor mínimo de presión intermedia. Esto se debe a que con presiones de alta bajas estamos sobrecargando en mayor medida el compresor de baja, lo que penaliza el rendimiento. Pero lo interesante sucede a partir de cierta presión, en torno a 38 bar de presión en el compresor de alta vemos como se cruzan las líneas de la gráfica, lo que indica que a partir de cierto punto penaliza en mayor medida usar presiones intermedias más bajas y la pendiente para presiones intermedias más elevadas es más reducida.

Esto nos da resultados gráficos para poder escoger los parámetros de trabajo del ciclo para maximizar el rendimiento y obtener la temperatura en el condensador deseada.

En esta gráfica se muestra la evolución del rendimiento para distintas presiones intermedias con el aumento de la temperatura alcanzada en el condensador.

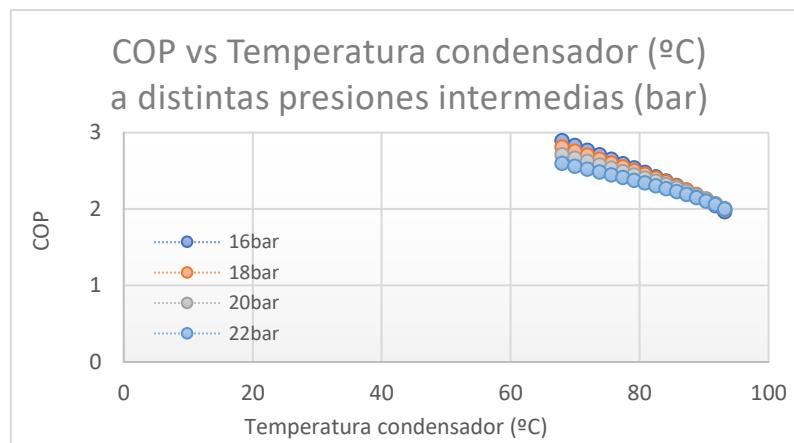


Ilustración 73. Evolución COP (Rendimiento) frente a la temperatura del condensador. Ciclo compuesto. Propano.

La evolución es muy similar a la de la gráfica anterior, y se observa el cruce de las líneas de tendencia de las series a partir de unos 92°C en el condensador.

El COP se reduce con el aumento de la temperatura en el condensador porque se requieren mayores presiones, por ello tiene la misma tendencia que la otra gráfica. Esta gráfica tiene la utilidad de poder ver que rendimiento podemos alcanzar en el ciclo para la temperatura en el condensador deseada, que es realmente una condición de contorno. de tendencia de las series a partir de unos 92°C en el condensador. El COP se reduce con el aumento de la temperatura en el condensador porque se requieren mayores presiones, por ello tiene la misma tendencia que la otra gráfica. Esta gráfica tiene la utilidad de poder ver que rendimiento podemos alcanzar en el ciclo para la temperatura en el condensador deseada, que es realmente una condición de contorno.

En la evolución de la temperatura del condensador frente a la presión de alta se puede ver una relación creciente, como era de esperar, pues cuanto mayor es la presión nos desplazamos verticalmente hacia arriba en el diagrama PH, lo que se traduce en un nivel térmico superior.

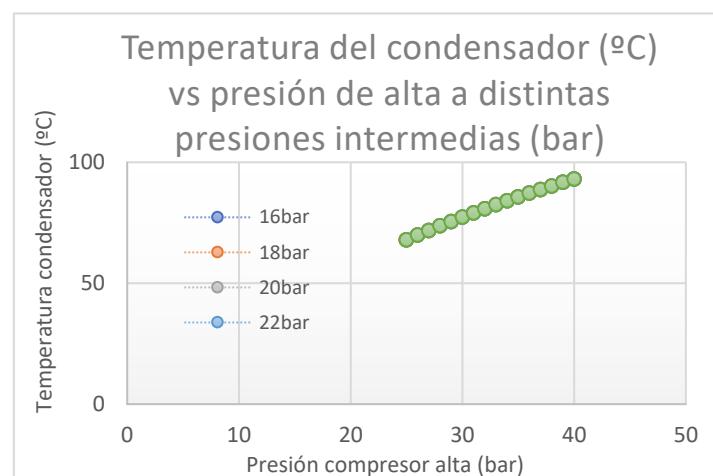


Ilustración 74. Evolución de la temperatura del condensador frente a la presión. Ciclo compuesto. Propano.

La influencia de la presión intermedia en este caso es irrelevante, pues no influye en el nivel térmico alcanzado por ello se solapan las distintas series. Conforme aumenta la presión de alta, aumenta el nivel térmico y por ende el flujo de calor intercambiado en el condensador.

Este crece de manera exponencial con la presión, y conforme aumenta la presión intermedia el calor cedido se ve minorado en gran medida y aún más conforme aumenta la presión de alta. Esta información es relevante de cara al comportamiento del refrigerante a la hora de diseñar el ciclo. La razón de este fenómeno es que, si aumentamos la presión intermedia, el trabajo de compresión del compresor de alta es menor, y por ende el calor cedido en el condensador.

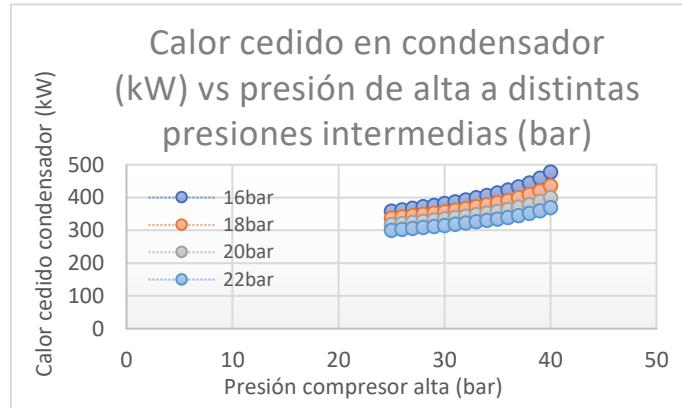


Ilustración 75. Evolución flujo de calor del condensador frente a presión. Ciclo compuesto. Propano.

*Flujo de calor multiplicado por flujo másico (kJ/kg x kg/s → kW)

Amoniaco (R717)

Para algunas de las simulaciones del amoniaco, se muestra la evolución de ciertas variables de interés frente al aumento de la presión intermedia y para distintos puntos de presión máxima del ciclo (compresor de alta). Esta forma de proceder es similar a la de los otros refrigerantes, pero la apreciación de los resultados difiere, de ahí está breve explicación.

Con el amoniaco se ha procedido de esta manera porque era más cómodo para la obtención de resultados, además se realizan apreciaciones desde otra perspectiva. Además, los puntos de presión máxima son aquellos en los que se simula para obtener una temperatura determinada en el condensador.

En esta gráfica se ve la evolución del consumo del compresor de alta con el aumento de la presión intermedia.

A su vez las distintas series muestran simulaciones con distintas presiones de alta. Cuanto mayor es la presión de alta el consumo aumenta, y a su vez conforme aumenta la presión intermedia el consumo disminuye.

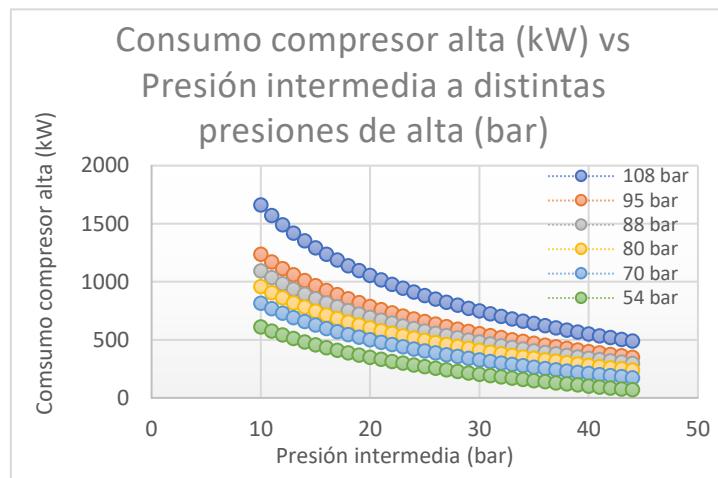


Ilustración 76. Evolución consumo de compresor frente a la presión. Ciclo compuesto. Amoniaco.

En la gráfica podemos ver la evolución del rendimiento (COP) con el aumento de la presión intermedia, el cual se mantiene con tendencia constante, pero se observa que sí que tiene efecto sobre el mismo. Primero aumenta ligeramente alcanzando un punto de inflexión, donde el rendimiento es máximo, para después verse reducido con el aumento de la presión intermedia.

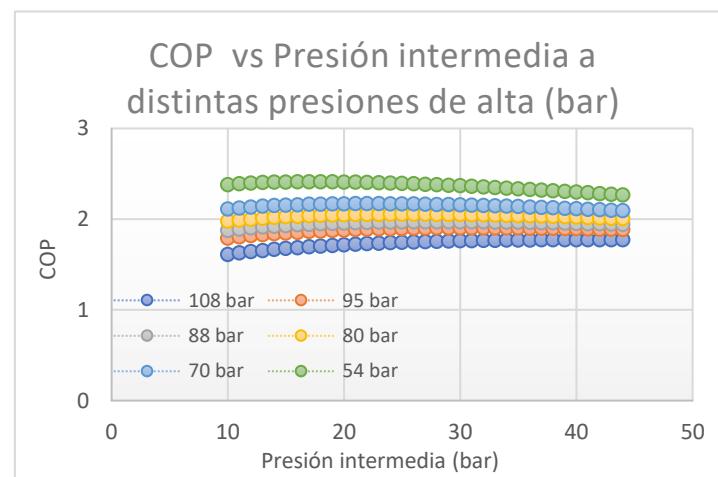


Ilustración 77. Evolución COP (Rendimiento) frente a la presión. Ciclo compuesto. Amoniaco.

Este análisis nos ayuda a escoger puntos de funcionamiento donde podamos maximizar el rendimiento.

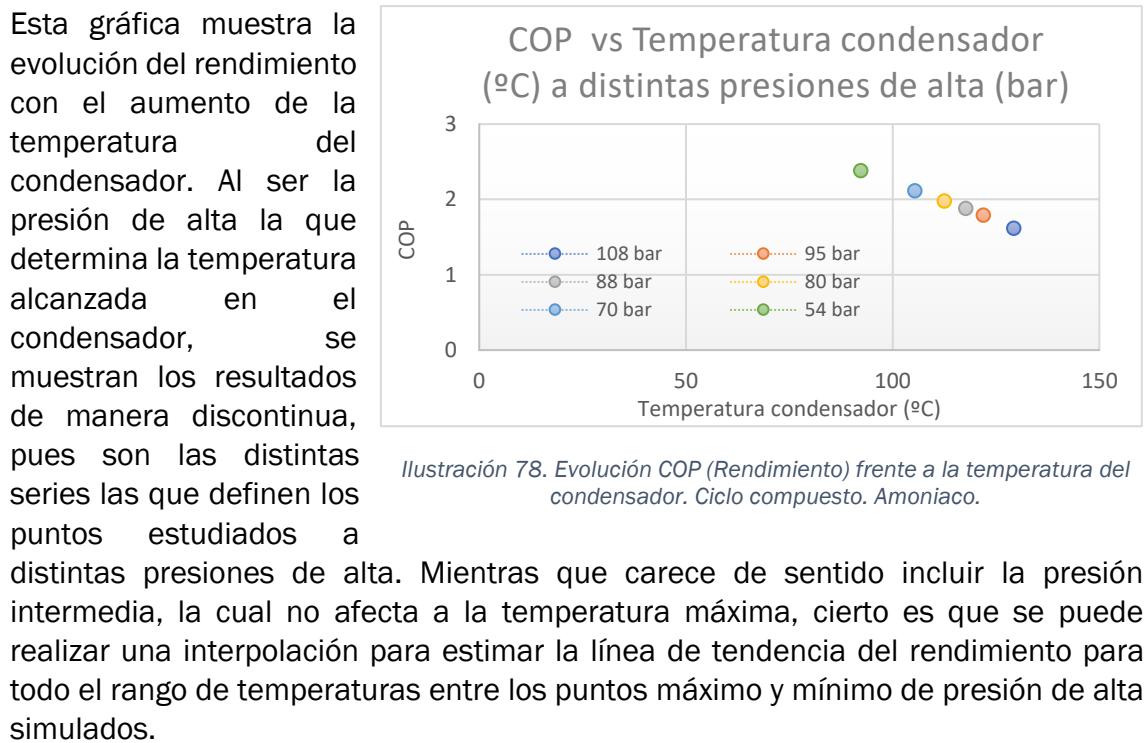


Ilustración 78. Evolución COP (Rendimiento) frente a la temperatura del condensador. Ciclo compuesto. Amoniaco.

Analizando los resultados se observa que el rendimiento es menor cuanto mayor es la temperatura en el condensador. Esto es porque la presión de alta aumenta también y esto penaliza el rendimiento, como se ha visto antes.

Esta gráfica muestra la evolución de la temperatura con el aumento de la presión de alta, la cual es creciente con la misma.

Esto puede corroborar lo antes comentado, a mayor presión de alta de ciclo mayor nivel térmico se alcanza en el condensador, a su vez la presión intermedia no influye en este resultado.

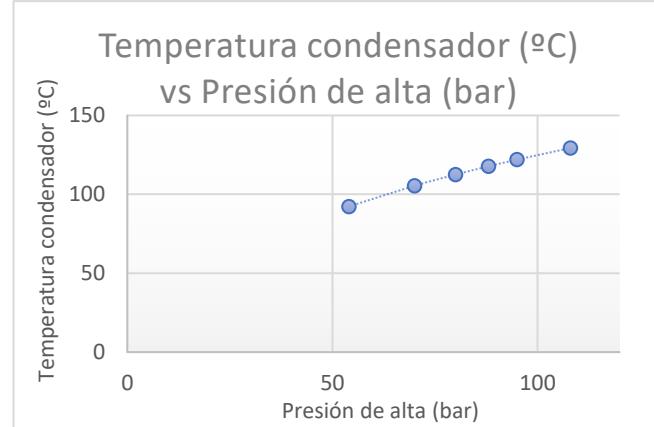


Ilustración 79. Evolución de la temperatura del condensador frente a la presión. Ciclo compuesto. Amoniaco.

Con estos resultados se puede optimizar la simulación atendiendo a la necesidad térmica y a su vez el rendimiento del ciclo. Este aspecto es muy importante a la hora de escoger ciertos procesos en los que el nivel térmico requerido sea el idóneo para cada refrigerante buscando el que mayor rendimiento sea capaz de dar.

Esta última gráfica muestra la evolución del calor cedido en el condensador con el aumento de la presión intermedia para distintos puntos de presión de alta.

Conforme aumenta la presión intermedia el calor cedido en el condensador se reduce, de igual manera como sucede con el propano. A su vez, conforme aumentamos la presión de alta del ciclo, nos situamos en un nivel térmico superior por lo que el calor cedido es mayor.

*Flujo de calor multiplicado por flujo másico (kJ/kg x kg/s → kW)

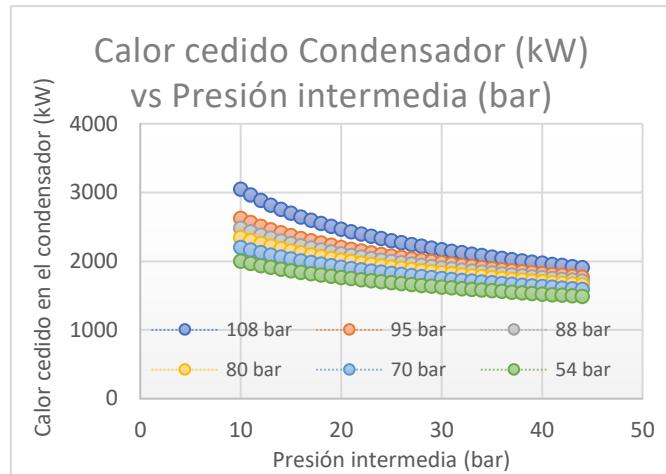


Ilustración 80. Evolución flujo de calor del condensador frente a presión. Ciclo compuesto. Amoniaco.

Agua (R718)

La manera de proceder en las simulaciones con el agua ha sido similar al propano.

Se presenta gráficamente la evolución de las variables con la variación de la presión de alta y en distintos puntos de presión intermedia.

Como antes ya se vio el interés del agua como refrigerante radica en su potencial para aplicación en ciclos en cascada (serie) pues de manera individual su naturaleza no permite aplicación con las condiciones del entorno establecidas.

Esta gráfica muestra la evolución del consumo del compresor de alta con el aumento de la presión de alta, el cual es creciente.

A su vez se presenta la evolución a distintos puntos de presión intermedia, dando como resultado que si se incrementa la presión intermedia el salto de presión en el compresor de alta se ve reducido, por ello su consumo es menor.

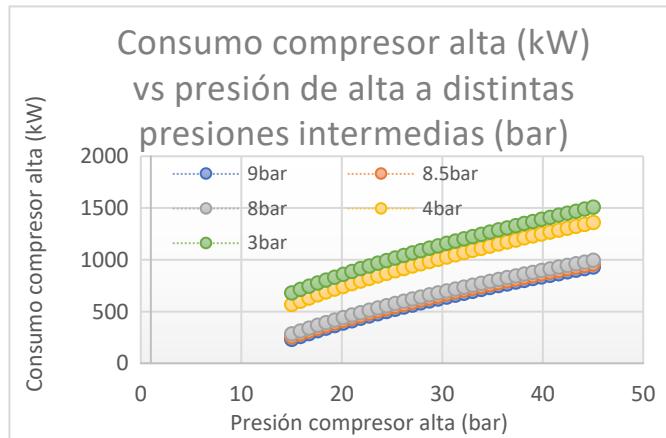


Ilustración 81. Evolución consumo de compresor frente a la presión. Ciclo compuesto. Agua.

Cierto es que el consumo del compresor de baja también aumenta, pero globalmente afecta al rendimiento ligeramente, aumentándolo. Esto se comprueba a continuación y es digno de análisis.

En esta gráfica se analiza la evolución del rendimiento del ciclo con el aumento de la presión de alta, el cual es decreciente.

Conforme se reduce la presión intermedia, el rendimiento global del ciclo (COP) es ligeramente menor y a su vez su pendiente es más pronunciada.

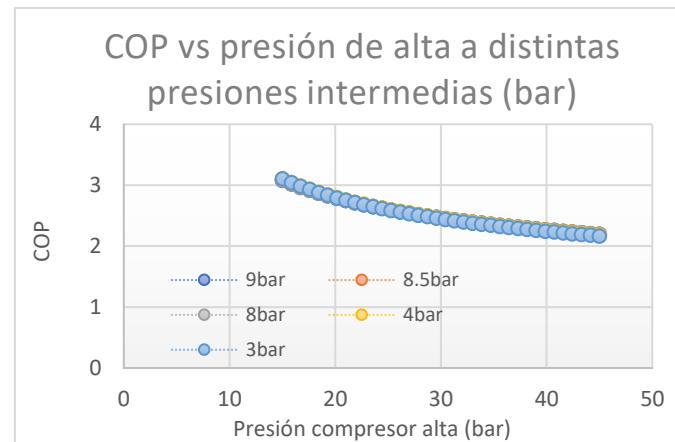


Ilustración 82. Evolución COP (Rendimiento) frente a la presión. Ciclo compuesto. Agua.

Como conclusión se puede extraer que a nivel de rendimiento compensa más tener una presión intermedia superior.

Nota: Las líneas de tendencia de 9 y 8.5 bar se solapan con la de 8 bar, debido a su proximidad, por ello no se aprecian diferencias.

En esta gráfica se muestra la evolución del rendimiento del ciclo con el aumento de la presión de alta, a distintas presiones intermedias.

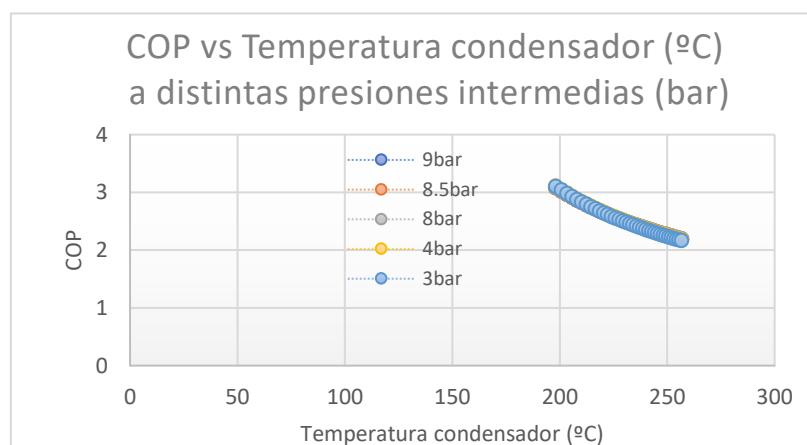


Ilustración 83. Evolución COP (Rendimiento) frente a la temperatura del condensador. Ciclo compuesto. Agua.

Estando directamente relacionadas presión y temperatura, la evolución es idéntica a la del rendimiento frente a la presión, por ello las conclusiones son las mismas.

Además, sucede lo mismo, conforme aumenta la presión intermedia el rendimiento es ligeramente superior y decrece con una pendiente menor.

La gráfica muestra la evolución de la temperatura en el condensador con el aumento de la presión de alta. Ambas variables tienen una relación creciente, y como se puede ver la presión intermedia no afecta al nivel térmico alcanzado, esto ya se comentó anteriormente.

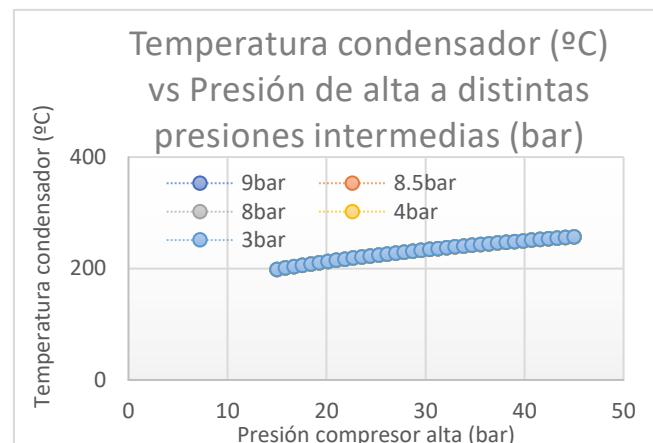


Ilustración 84. Evolución de la temperatura del condensador frente a la presión. Ciclo compuesto. Agua.

En esta gráfica se puede ver la evolución del calor cedido en el condensador con el aumento de la presión de alta, siendo una evolución creciente con la misma, pues aumenta el nivel térmico. Además, conforme aumenta la presión intermedia el calor cedido en el condensador es menor.

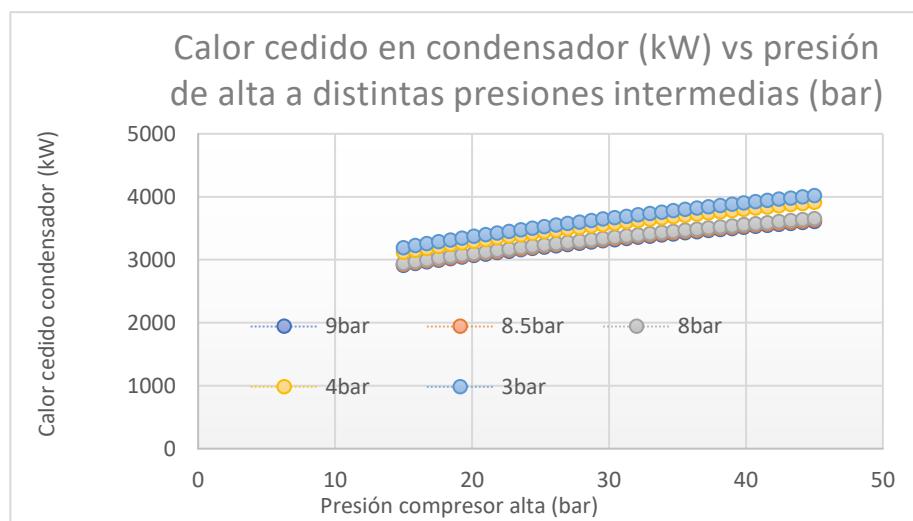


Ilustración 85. Evolución flujo de calor del condensador frente a presión. Ciclo compuesto. Agua.

*Flujo de calor multiplicado por flujo másico (kJ/kg x kg/s → kW)

Pentano

Al igual que con el propano y con el agua, con el pentano se ven los resultados de la evolución de las variables frente al aumento de la presión de alta, en este caso para un solo valor de presión intermedia. En este caso se ha simulado para solo una presión intermedia porque es la máxima que el propano permite físicamente para que el ciclo funcione correctamente, además el rendimiento obtenido es el mayor.

Esta grafica muestra la evolución del consumo del compresor con el aumento de la presión de alta.

Esta es una evolución creciente, además de manera exponencial, con la misma.

Esta gráfica muestra la evolución del rendimiento del ciclo con el aumento de la presión de alta, siendo una relación decreciente donde la pendiente se va reduciendo conforme aumenta la presión.

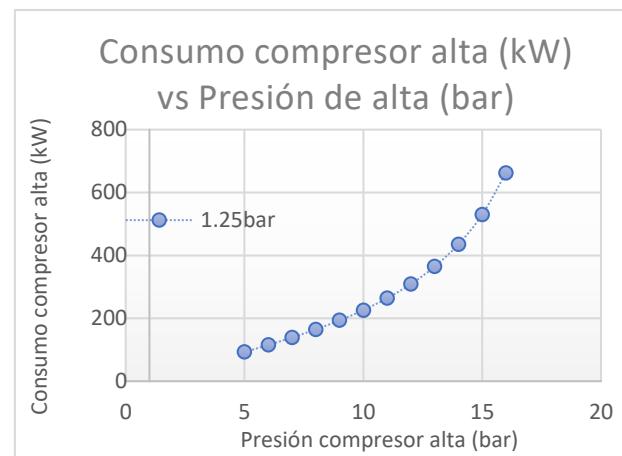


Ilustración 86. Evolución consumo de compresor frente a la presión. Ciclo compuesto. Pentano.

Esta es la evolución del rendimiento con el aumento de la temperatura del condensador, siendo una relación lineal como se puede ver gráficamente.

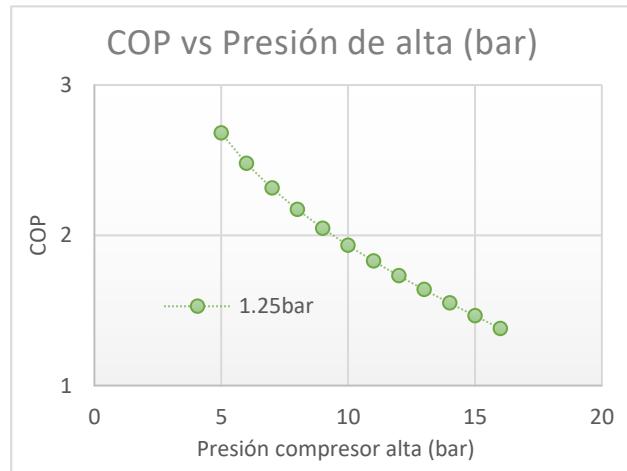


Ilustración 87. Evolución COP (Rendimiento) frente a la presión. Ciclo compuesto. Pentano.

El rendimiento disminuye conforme aumenta la temperatura en el condensador, esto se debe a que aumentar el nivel térmico conlleva aumentar la presión alcanzada y como ya se ha visto, penaliza en cuanto el rendimiento.

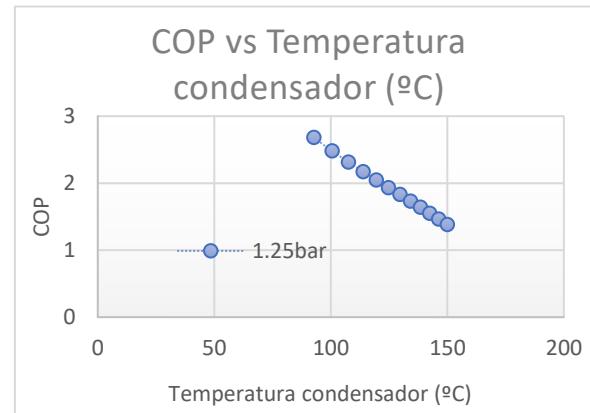


Ilustración 88. Evolución COP (Rendimiento) frente a la temperatura del condensador. Ciclo compuesto. Pentano.

Esta es la evolución de la temperatura del condensador con el aumento de la presión de alta.

Dado que conforme aumenta la presión también aumenta el nivel térmico, esta relación es creciente, donde la pendiente se ve reducida para presiones más altas.

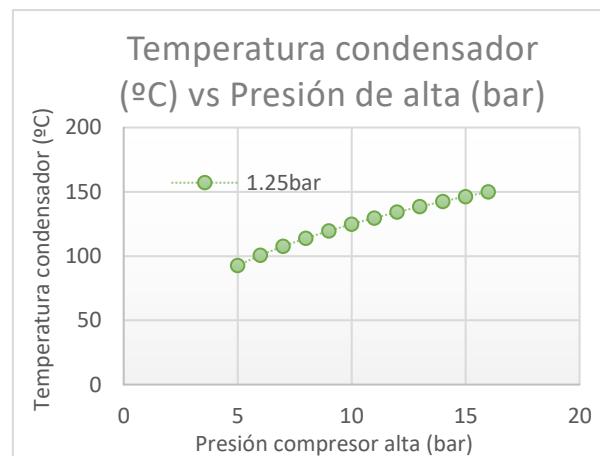


Ilustración 89. Evolución de la temperatura del condensador frente a la presión. Ciclo compuesto. Pentano.

En la evolución del calor cedido frente a la presión de alta se puede observar un crecimiento exponencial con la misma. Esto se debe al mayor nivel térmico.

*Flujo de calor multiplicado por flujo másico (kJ/kg x kg/s → kW)

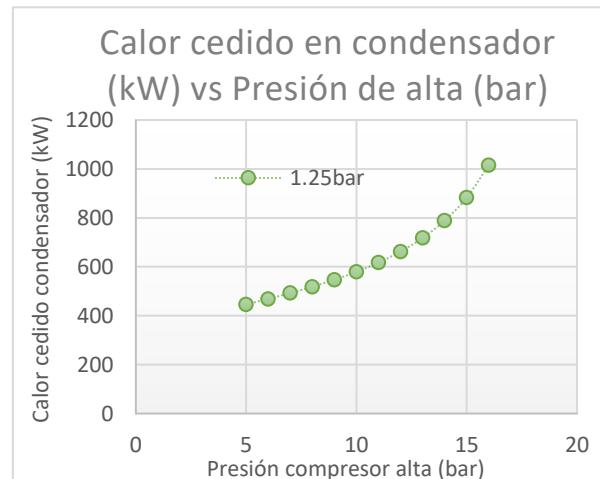


Ilustración 90. Evolución flujo de calor del condensador frente a presión. Ciclo compuesto. Pentano.

4.1.3. – Ciclo en cascada

Para el ciclo en cascada se realizará un estudio paramétrico combinando dos refrigerantes en ciclos independientes en serie. Se han realizado las simulaciones con la combinación de amoniaco (en el ciclo inferior) y agua (en el ciclo superior).

A partir de los resultados en las simulaciones de ciclo simple, se han fijado los valores del ciclo inferior para su valor óptimo, donde el COP es máximo. De esta manera se realiza el estudio variando los parámetros de presión de alta únicamente en el ciclo superior, pues la presión de baja se ha fijado para intercambiar calor en el punto de conexión de ambos ciclos a la temperatura adecuada para tener un salto térmico apropiado en el intercambiador, el cual se ha definido basándose en situaciones prácticas realistas. Un salto térmico oscilando entre $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ y $\Delta T = 5.5^\circ\text{C}$ aproximadamente.

Para poder realizar la simulación, el flujo que circula por el ciclo superior tiene que ser el adecuado a cada situación de funcionamiento, pues no puede ser una condición de contorno si se quiere converger a una solución. Por ello en cada simulación este varía.

A continuación, se muestra de manera resumida los parámetros fijados y los intervalos del estudio paramétrico.

Tabla 7. Tabla resumen variables estudio paramétrico. Ciclo en cascada.

	Presión válvula expansión de baja (bar)	Presión compresor de alta (bar)	Temperatura condensador/evaporador (°C, punto intermedio)	Temperatura condensador ciclo de alta de (°C)
CICLO SUPERIOR (AGUA)	0.6	10 a 38	87.57	179 a 246
CICLO INFERIOR (AMONIACO)	2.26	50		88.52
COP GLOBAL	1.389 a 1.642			

En este caso, para el ciclo en cascada, los estudios paramétricos se han realizado de distinta manera. El procedimiento ha sido realizar tres casos de simulación distintos en los que se estudian los tres casos para el ciclo de baja en torno al máximo rendimiento, obteniendo como resultados lo siguiente.

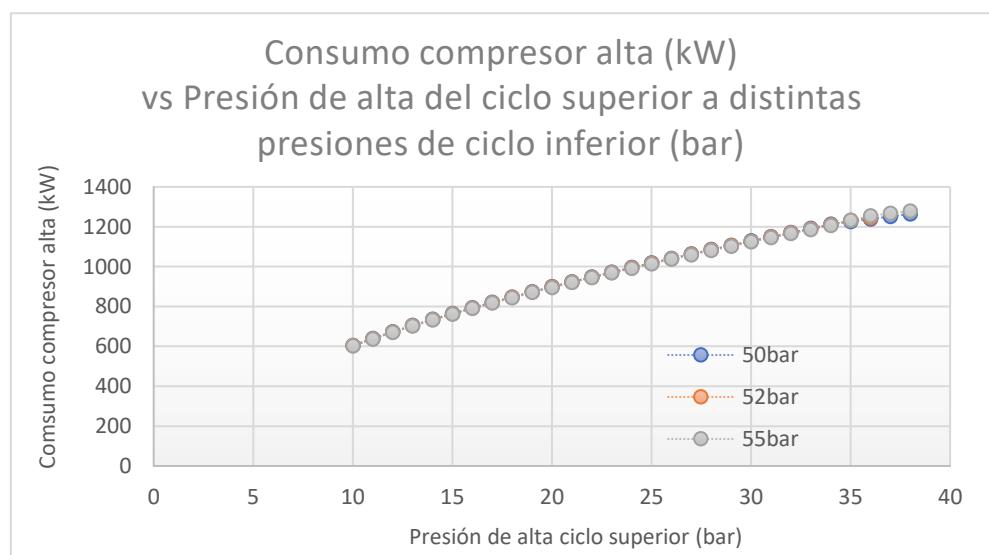
Tabla 8. Tabla resultados optimización ciclo de baja. Amoniaco. Ciclo en cascada.

CICLO INFERIOR (AMONIACO)	Presión válvula expansión (bar)	Presión de compresión (bar)	Temperatura condensador (°C)	Potencia compresor (kW)	COP
1º Caso	2.8	50	88.52	623.09	2.26
2º Caso	2.8	52	90.41	634.42	2.22
3º Caso	2.8	55	93.1546	650.79	2.16

En cuanto al ciclo inferior, se opta por la opción preferentemente por la opción donde el rendimiento individual de ciclo es mayor, a continuación, se justifican las decisiones con los resultados gráficos de evolución de las variables de estudio.

A continuación, las gráficas que se muestran recogen los resultados de los estudios paramétricos en cuanto a resultados globales, realmente los resultados de verdadero interés para la optimización.

En este caso los ciclos inferior y superior son independientes, únicamente les une el calor intercambiado en el condensador/evaporador intermedio.


Ilustración 91. Evolución consumo de compresor frente a la presión. Ciclo en cascada.

Por ello gráficamente se puede ver en la evolución del consumo del compresor de alta frente al aumento de la presión de alta que este es creciente, y además que se solapan las distintas presiones del ciclo de baja.

Esto justifica la independencia entre ciclos.

En esta grafica se muestra la evolución del rendimiento global frente al aumento de la presión de alta del ciclo superior para distintos puntos de presión de alta del ciclo inferior.

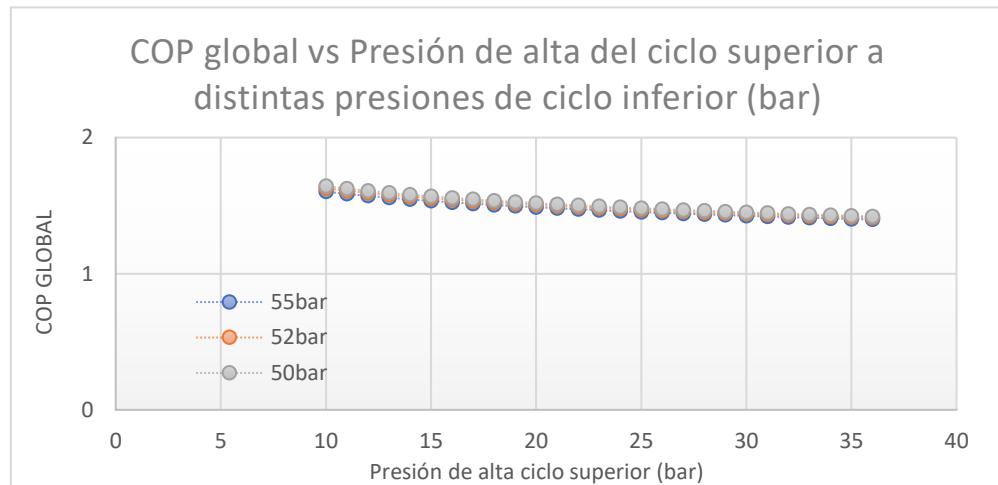


Ilustración 92. Evolución COP (Rendimiento) frente a la presión. Ciclo en cascada.

El rendimiento global decrece con el aumento de la presión en el ciclo superior, mientras que a su vez, aumenta conforme reducimos la presión en el ciclo inferior, pues su rendimiento individual aumenta conforme se reduce la presión alcanzada.

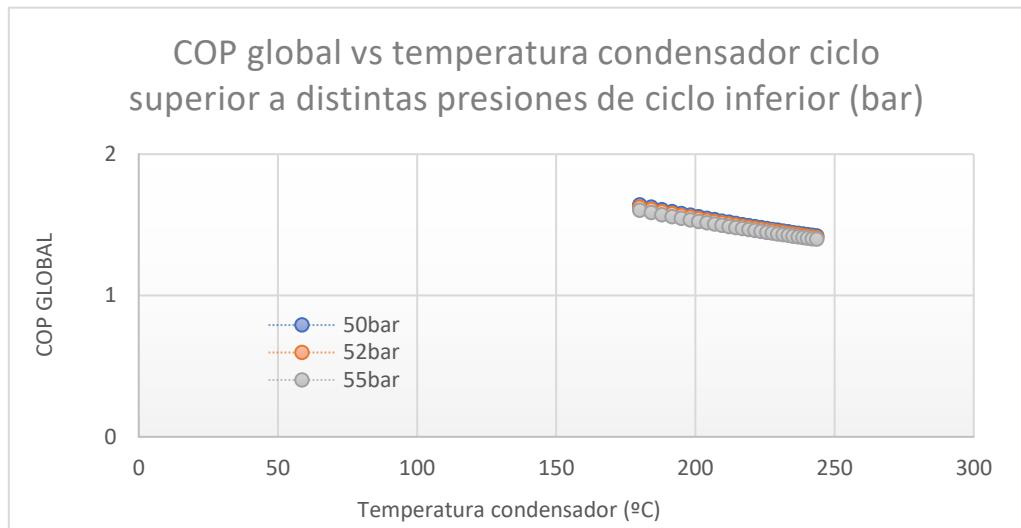


Ilustración 93. Evolución COP (Rendimiento) frente a la temperatura del condensador. Ciclo en cascada.

Esto es poco relevante pues su valor esta más orientado a alcanzar un nivel térmico determinado y los rendimientos son muy similares en torno a su valor máximo posible.

Debida a la relación directa entre presión y nivel térmico, la evolución del rendimiento frente a la temperatura en el condensador es exactamente la misma que la evolución del rendimiento con la presión.

En cuanto a la evolución de la temperatura en el condensador frente a la presión de alta del ciclo superior, esta es una relación creciente.

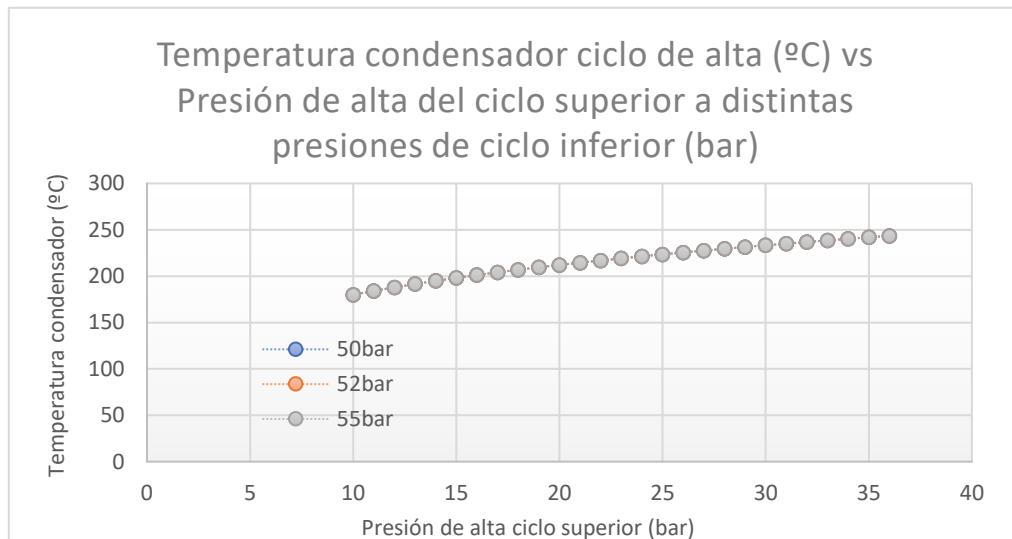


Ilustración 94. Evolución de la temperatura del condensador frente a la presión. Ciclo en cascada.

Pues estamos aumentando el nivel térmico conforme aumentamos la presión.

En la evolución del calor cedido en el condensador del ciclo superior se puede ver como conforme aumenta la presión máxima también aumenta el calor cedido y esto es debido al aumento del nivel térmico.

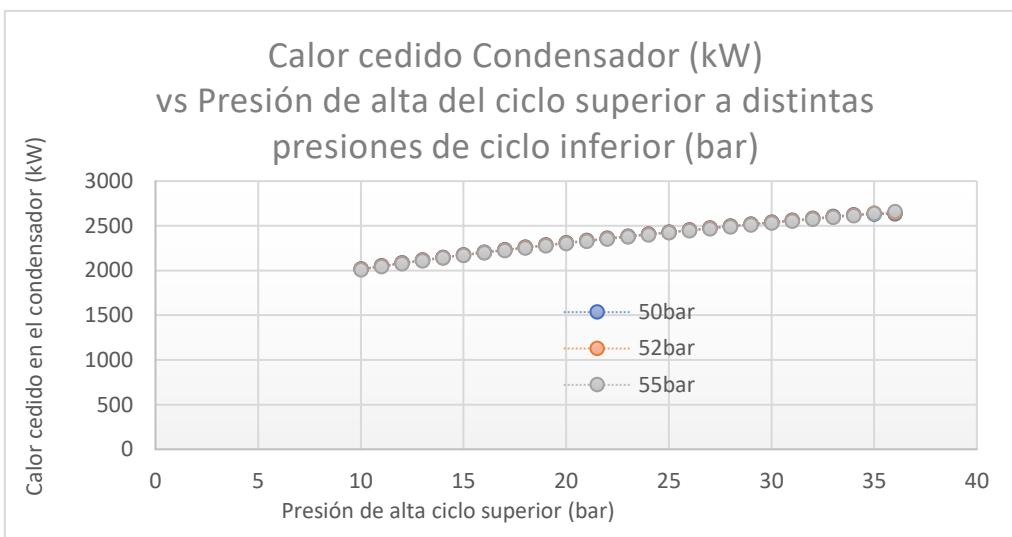


Ilustración 95. Evolución flujo de calor del condensador frente a presión. Ciclo en cascada.

Además, la presión del ciclo inferior no afecta a este resultado, como se puede ver gráficamente con el solape de las líneas de tendencia.

Esta gráfica se utiliza para mostrar como el flujo molar del ciclo superior se autoajusta a un valor posible para su funcionamiento físico debido a la necesidad de absorber en el ciclo superior el calor cedido en el ciclo inferior, de manera que se consiga un funcionamiento estacionario.

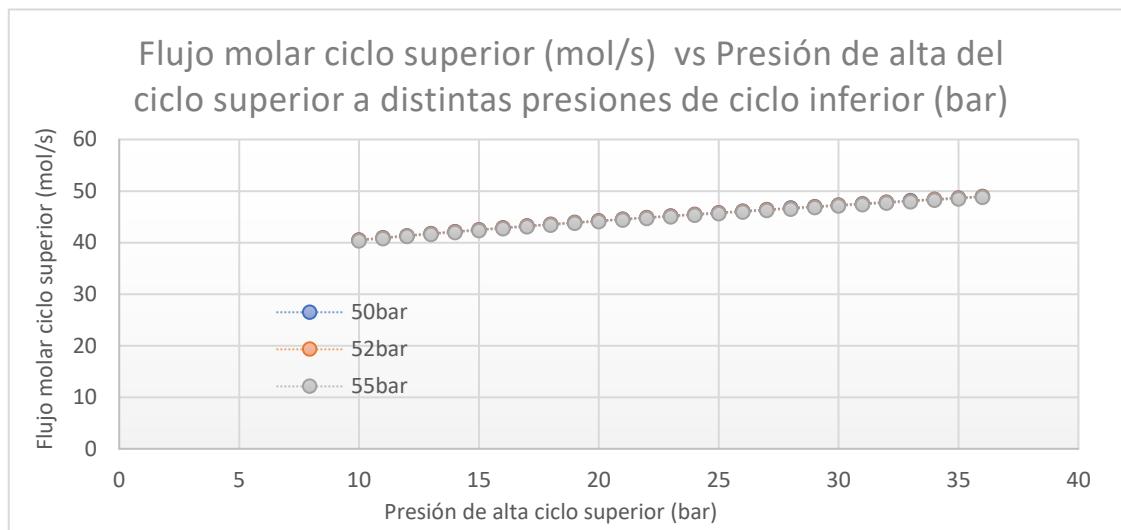


Ilustración 96. Evolución flujo molar del condensador frente a presión. Ciclo en cascada.

Los resultados muestran que conforme aumenta la presión del ciclo superior el flujo necesario para un funcionamiento estacionario aumenta, y a su vez, se solapan las líneas de tendencia para presiones del ciclo inferior.

Con el estudio de ciclo en cascada, se quiere mostrar la capacidad del sistema planteado para trabajar con alta temperatura y así poder abordar un mayor número de procesos industriales de manera que el interés de aplicación de este proyecto sea aún mayor. Para realizar las simulaciones se han probado distintas combinaciones de refrigerantes llegando a la conclusión de que la única combinación que da buenos resultados y es posible materializar es la expuesta. Amoniaco en el ciclo inferior, para dar con buen rendimiento el calor y el nivel térmico necesario al siguiente ciclo, que es el ciclo superior por el que circula agua, y con las condiciones de funcionamiento forman una combinación ideal.

Dando unos resultados muy favorable de cara al cumplimiento de los objetivos planteados para este proyecto. Pues se consigue un alto nivel térmico y un rendimiento global muy bueno para ser una primera aproximación a la idealización de este sistema. Pudiendo aumentar notablemente el rendimiento con la elaboración de ciclos más sofisticados, pero con el mismo planteamiento.

4.2. – Comparativa y análisis de resultados

En este apartado, tras realizar los estudios paramétricos y agrupar los resultados de cada ciclo con cada refrigerante, se muestra la comparativa entre refrigerantes. De modo que se pueda analizar la viabilidad para su uso, así como sacar conclusiones acerca del comportamiento en cada ciclo.

Para proceder, se realiza la comparativa en base a tres propiedades que son las principales a la hora de seleccionar un refrigerante para su uso en un determinado proceso, así como el ciclo más óptimo en cada situación.

Estas propiedades son:

- **Calor cedido en el condensador** (Qcond, kW).
- **Nivel térmico alcanzado.** (Tcond, °C).
- **Rendimiento del ciclo.** (COP).
- **Trabajo de compresión.** (Wcomp, kW).

Gráficamente se muestran las variables como se puede ver en la [Ilustración 46. Variables de interés para la simulación.], del apartado 3.2. A excepción del nivel térmico alcanzado, el cual se compara entre los distintos ciclos y refrigerantes para analizar la viabilidad de aplicación a cada proceso.

A modo de resumen, los refrigerantes estudiados son:

- **Propano (R290)**
- **Amoniaco (R718)**
- **Agua (R717)**
- **Pentano.**

Y los ciclos simulados:

- **Ciclo simple.**
- **Ciclo con compresión múltiple autoenfriada.**
- **Ciclo en cascada.**

4.2.1. – Ciclo simple

A continuación se muestran una serie de gráficas en las que se puede ver, a modo de comparativa para los distintos refrigerantes, la evolución de las distintas variables analizadas. De esta manera se podrá ver en qué nivel se trabaja con cada refrigerante, de manera que se pueda hacer la elección del más adecuado a cada proceso industrial al que apliquen.

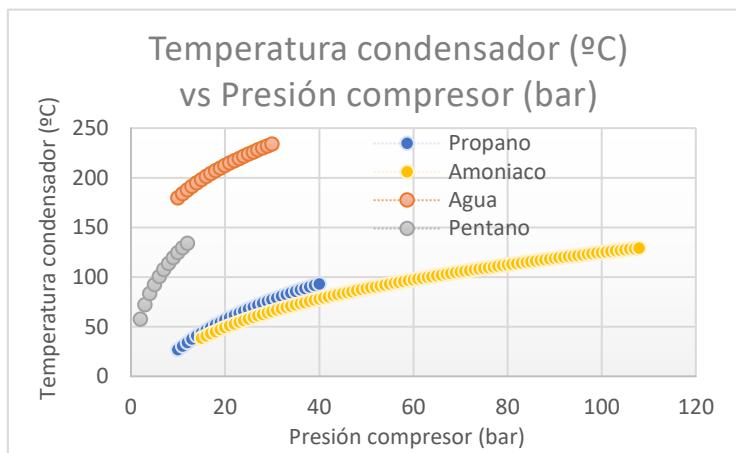


Ilustración 97. Resultado comparativo simulación. Nivel térmico.
Ciclo simple

En esta gráfica se muestra de manera comparativa la evolución de la temperatura de intercambio en el condensador frente a la presión de alta del ciclo.

Se puede ver que el agua se encuentra en un nivel térmico muy superior a los otros refrigerantes, esto es debido a que el planteamiento que se ha hecho parte de esta base.

Donde la temperatura ambiente de intercambio en el evaporador simulada para él agua es de 90°C aproximadamente, pues el agua trabaja mejor en este rango y ha planteado así para poder utilizarla en el ciclo en cascada, esto ya se explicó anteriormente.

Por otro lado, se puede ver como conforme aumenta la presión la temperatura también lo hace, esto es debido a que nos situamos en un nivel térmico superior. Observaciones que se pueden destacar son las siguientes. El pentano es adecuado para trabajar a baja presión, donde en apenas un rango de 0-15 bar ya conseguimos abarcar desde 50 hasta 140°C de nivel térmico, este resultado es interesante considerarlo como posibilidad para aplicación directa de este refrigerante en procesos donde el nivel térmico se encuentre dentro de este rango.

El Propano y el amoniaco son muy similares, siendo superior en cuanto a nivel térmico el propano. El propano llega hasta 100°C a la presión máxima que se ha podido simular, mientras que el amoniaco es el que mayores presiones puede alcanzar, llegando hasta los 110bar, y un nivel térmico de 140°C.

El amoniaco es muy interesante para aplicarlo en ciclo en cascada, pues sí que alcanza el nivel térmico adecuado para el ciclo consecutivo y además tiene buen rendimiento, como más adelante se verá, siendo capaz de trabajar a altas presiones.

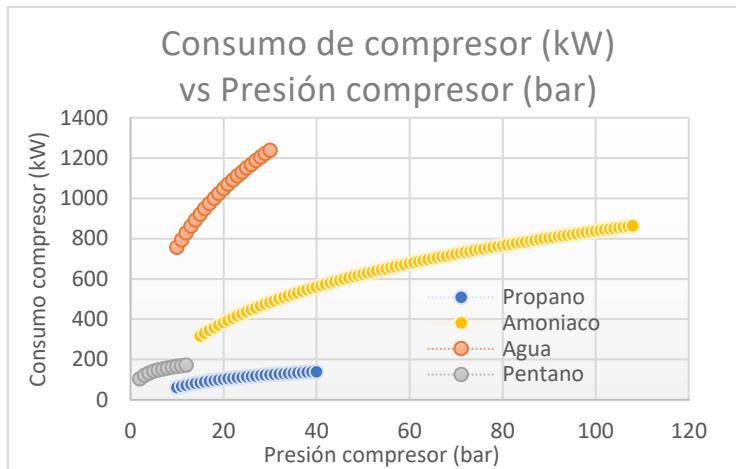


Ilustración 98. Resultado comparativo simulación. Consumo compresor. Ciclo simple

conforme se trabaja a distintas presiones. Se puede ver como el agua tiene la pendiente más pronunciada, y esto quiere decir que en un salto de presión igual a otro refrigerante, el consumo del compresor aumenta en mayor medida. Esto da indicios de que penaliza el rendimiento, pero entra en juego otro factor importante. Siendo esté el flujo de calor intercambiado, que si acompaña proporcionalmente este aumento, podría incluso ser mejor en rendimiento que los demás refrigerantes.

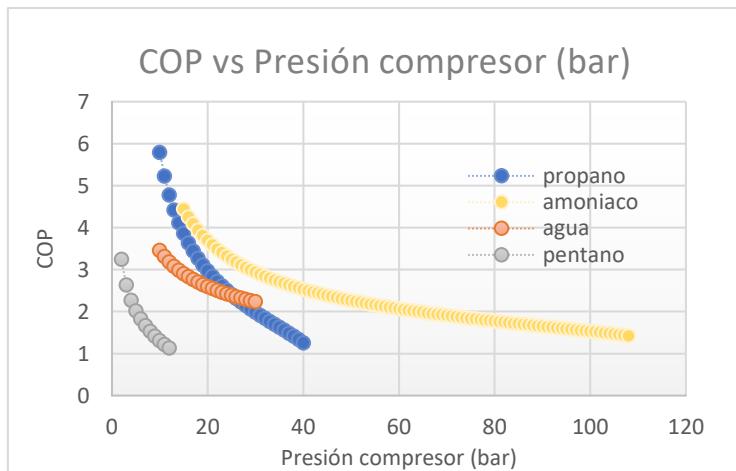


Ilustración 99. Resultado comparativo simulación. COP. Ciclo simple

refrigerantes, esto quiere decir que a pesar de aumentar el consumo del compresor en mayor medida, como se vio en la gráfica anterior, el calor cedido en el condensador aumenta también proporcionalmente y esto hace que el rendimiento disminuya de manera más progresiva.

En cuanto a los demás refrigerantes, se puede ver como la pendiente más decreciente la tiene el propano, lo cual hace desfavorable su elección para altas temperaturas, al igual que el pentano, mientras que el amoniaco tiene al principio

En esta gráfica se muestra la evolución del consumo del compresor frente al aumento de la presión de compresión.

Es directo entender que conforme aumenta la presión aumenta el consumo del compresor, pero hay que destacar un aspecto muy importante que da explicación al rendimiento que tienen unos refrigerantes y otros

En esta gráfica se compara la evolución del rendimiento del ciclo (COP) frente al aumento de la presión de compresión. En este caso, la pendiente de la curva para cada refrigerante es clave a la hora de realizar la optimización para maximizar rendimiento. Se puede ver como la pendiente del agua es menor que la de los demás

una pendiente mayor, después se vuelve una curva más tendida lo que lo hace ideal para trabajar en un rango de presiones y niveles térmicos mayor.

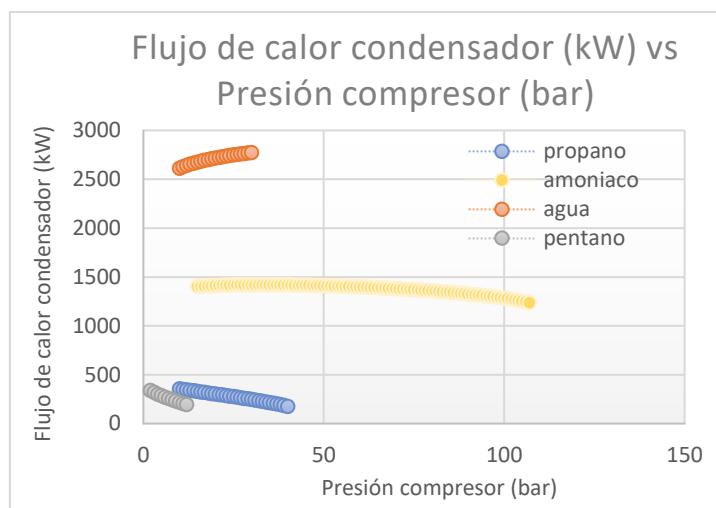


Ilustración 100. Resultado comparativo simulación. Flujo de calor condensador. Ciclo simple

Esta gráfica muestra la evolución del flujo de calor en el condensador frente al aumento de la presión de compresión.

*Flujo de calor multiplicado por flujo másico (kJ/kg x kg/s → kW)

Como se puede ver el agua tiene un aumento del flujo de calor con el aumento de la presión, esto hace que su rendimiento se vea penalizado en menor medida

que los demás refrigerantes, esto explica la menor disminución del rendimiento que se pudo destacar en la gráfica anterior. Mientras que el pentano y el propano tienen una disminución del flujo de calor, lo cual explica su caída en picado del rendimiento con el aumento de presión, como se vio en la gráfica de evolución del COP, el amoniaco tiene un comportamiento bastante estable, esto hace que se pueda contener la disminución del rendimiento con el aumento de la presión, haciéndolo el refrigerante ideal para su uso en el rango más amplio de presiones y de nivel térmico.

Una vez comparado el comportamiento entre los distintos refrigerantes, se procede a analizar el comportamiento de cada uno de ellos, donde gráficamente se recogen las variables definidas para el estudio de interés mayoritario. Siendo estas el rendimiento del ciclo (COP), el calor obtenido en el condensador (Q_{cond}) y el trabajo de compresión (W_{comp}). De esta manera se puede concluir para cada uno de los refrigerantes el punto óptimo de condiciones de funcionamiento.

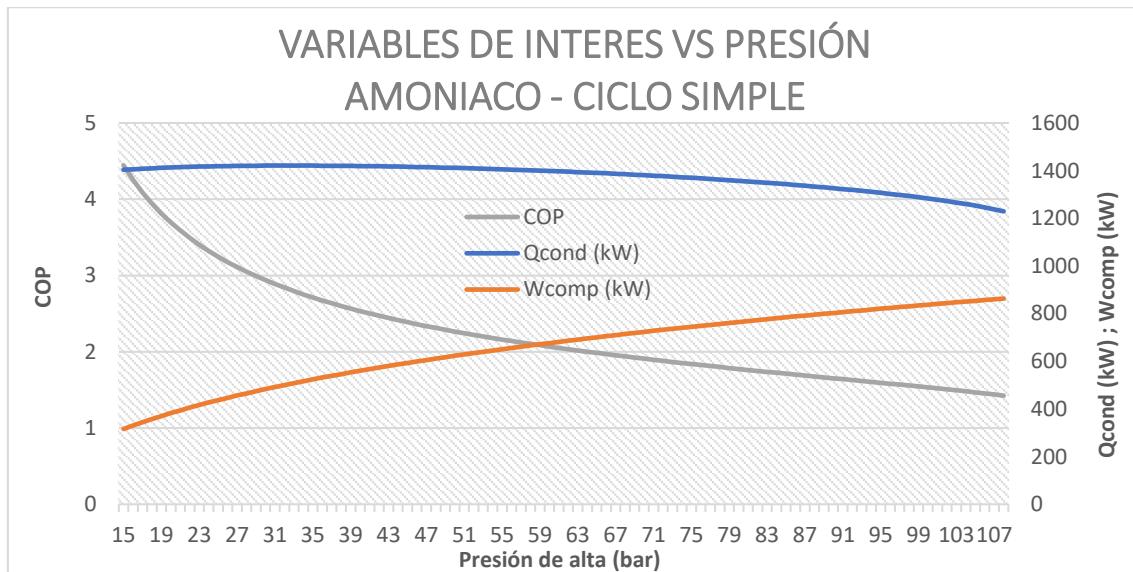


Ilustración 101. Variables de interés. Amoniaco. Ciclo simple.

En la gráfica se puede ver el comportamiento del amoniaco frente al aumento de la presión, donde se muestra la evolución del rendimiento, calor cedido y trabajo de compresión. Esto da una idea más clara de cómo se comporta este refrigerante, de cara a la optimización, es indispensable.

Con el aumento de la presión, se puede destacar lo siguiente. Primero, el rendimiento se ve penalizado, primero en mayor medida y después de manera más contenida, esto destaca la aptitud para trabajar en un rango alto de presiones. Segundo, el calor cedido en el condensador alcanza un pico en torno a 30 bar, esto es interesante considerarlo si nuestro objetivo es maximizar el flujo de calor sin tener que aumentar el flujo másico. Tercero, el trabajo de compresión crece de manera constante con el aumento de la presión.

Conclusión para el amoniaco. Es ideal para trabajar con un rango más amplio de presiones, abarcando además un rango muy amplio. El flujo de calor es bastante constante y tiene un máximo para una zona donde el rendimiento está próximo a su valor máximo. El rendimiento tiene un valor apropiado, en torno a $COP=2$, para el rango intermedio de presiones, donde trabajara en la práctica.

A la vista de estos resultados, este refrigerante es ideal para utilizarlo en ciclo en cascada pues tiene buen rendimiento, buen flujo de calor, y todo en un rango muy amplio de presiones.

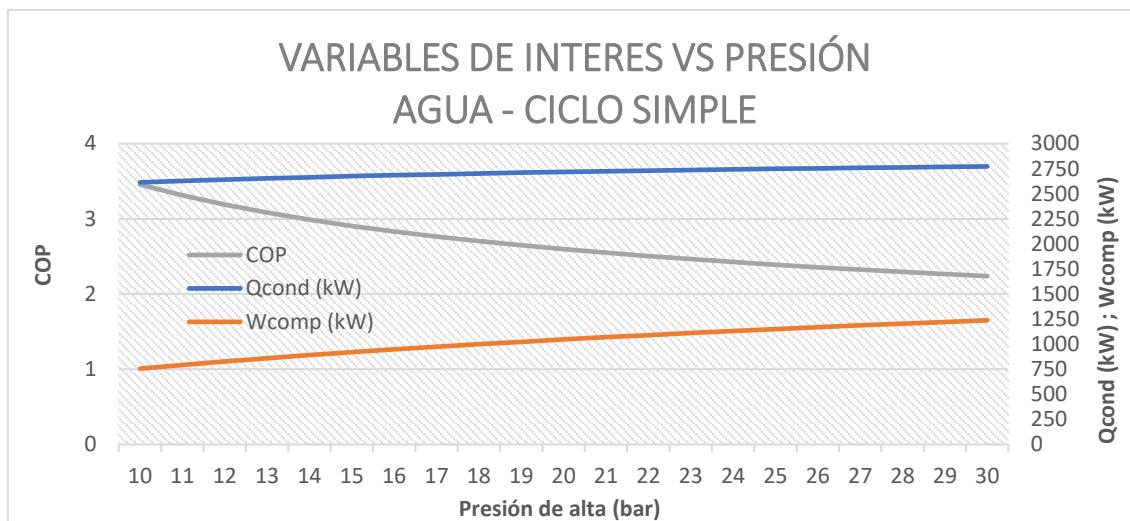


Ilustración 102. Variables de interés. Agua. Ciclo simple.

En la gráfica del agua se pueden destacar los siguientes aspectos. El flujo de calor es muy elevado comparado con los otros refrigerantes, esto hace que su aplicación sea muy apropiada en determinados procesos donde se demanden un elevado flujo, además es creciente en todo el rango de presiones que se han simulado, mientras que el rendimiento disminuye debido a que el aumento del flujo de calor tiene menor pendiente que el aumento de la presión de compresión, como se puede observar.

También se destaca que el rendimiento se mantiene en un valor adecuado ($COP > 2$) en todo el rango de presiones lo cual se traduce en que se puede utilizar este refrigerante en todo su rango sin tener miedo a penalizar el rendimiento. Por lo que, trabajando en las zonas de máxima presión, se trabajará en el máximo nivel térmico de este refrigerante, sin que el rendimiento baje de $COP = 2$, además maximizando el flujo de calor.

Como conclusiones se puede destacar que, como ya se ha visto debido a la naturaleza del agua, esta se utilizará en ciclo en cascada para poder operar partiendo de un nivel térmico adecuado para su uso en el evaporador. Y dando la posibilidad de alcanzar temperaturas muy elevadas en el ciclo de alta, como ya se verá más adelante, pudiendo aplicar así a cualquier proceso industrial de los mencionados.

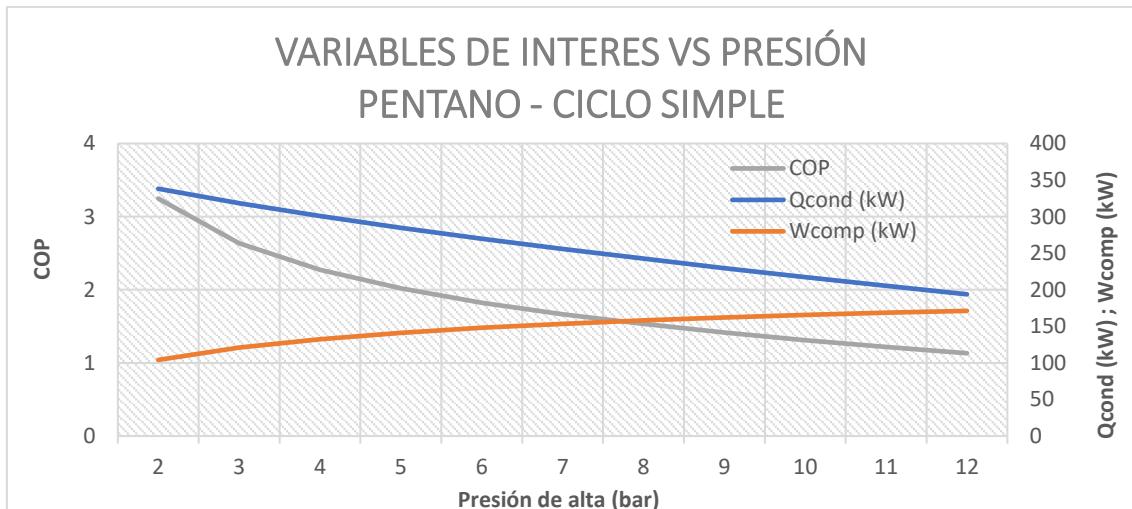


Ilustración 103. Variables de interés. Pentano. Ciclo simple.

En esta gráfica se pueden destacar estos aspectos. El rendimiento se ve penalizado con el aumento de la presión, además a presiones bajas ya cruza el valor de COP=2, y esto hace que carezca de interés la aplicación de este refrigerante comparando con los resultados del agua o el amoniaco.

Además el calor cedido en el condensador es muy inferior que el agua o el amoniaco, del orden de 6 veces menor frente al agua y 3 veces menor frente al amoniaco. Se destaca también que disminuye con pendiente constante con el aumento de la presión de compresión.

El trabajo de compresión aumenta, en mayor medida que el calor, por ello el rendimiento se reduce tanto.

Es cierto que a baja presión, por debajo de 3 bar, el rendimiento no está por debajo de 2, pero el nivel térmico en ese rango es insignificante, y si a eso se le suma el bajo flujo de calor, hace que el interés en su aplicación disminuya considerablemente.

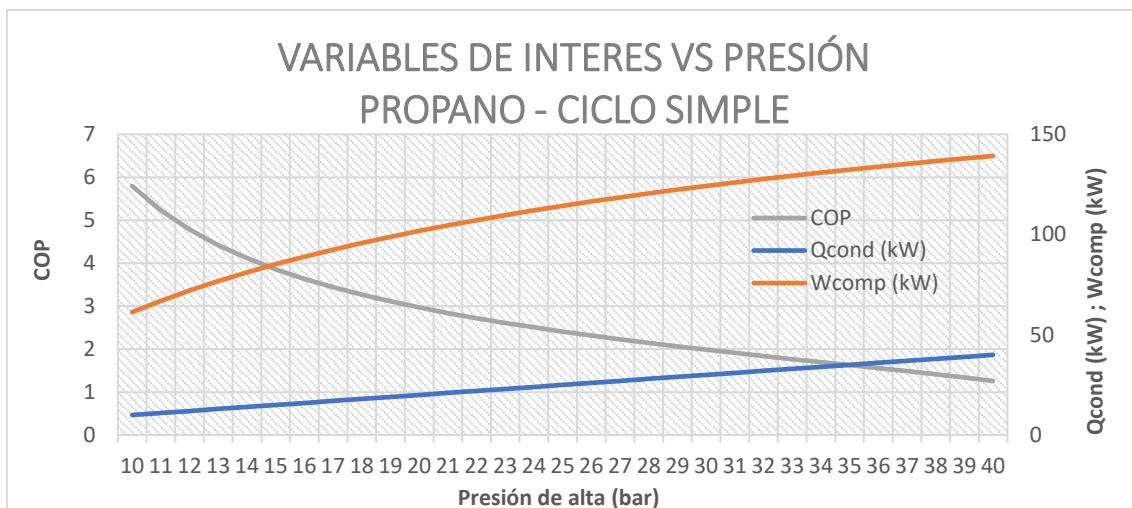


Ilustración 104. Variables de interés. Propano. Ciclo simple.

El propano tiene los siguientes aspectos más destacables. El flujo de calor por unidad de masa es insignificante en comparación a cualquiera de los otros refrigerantes, debido a sus propiedades como calor específico o entalpia de cambio de fase. Esto hace que el interés en su aplicación se vea minorada en comparación con los demás refrigerantes.

Si que es cierto que con el aumento de la presión el trabajo de compresión aumenta, pero también lo hace, aunque en menor medida, el flujo de calor. Esto contiene la disminución del rendimiento por lo que sí que es un aspecto positivo el mantener un buen rendimiento en un amplio rango de presiones. Como conclusión, este refrigerante no tiene mucho interés más allá de aplicaciones de baja demanda térmica.

Las conclusiones del ciclo simple son las siguientes.

El ciclo simple ha servido para modelizar el comportamiento de los distintos refrigerantes, siendo un ciclo muy básico sin nada de optimización, donde los rendimientos son los más bajos posibles. De este modo se ha modelizado el comportamiento de los refrigerantes y, más en aspectos como la evolución de unas variables frente a otras. El siguiente paso es optimizar el ciclo de manera que los resultados mejoren, pero ya conociendo el comportamiento de cada refrigerante, lo cual es el punto de interés de estas simulaciones.

En cuanto a las conclusiones del comportamiento de los refrigerantes en el ciclo simple, los que cuentan con mayores cualidades son el amoniaco y el agua. Aunando aspectos como elevado flujo de calor, elevado nivel térmico y un buen rendimiento en la mayoría del rango de presiones simulado. Mientras que el propano y el pentano son más adecuados en procesos con baja demanda térmica y su rendimiento es bastante inferior en niveles térmicos elevados.

4.2.2. – Ciclo compuesto

En el caso del ciclo compuesto se procede de igual manera que en el ciclo simple, a diferencia de que para este ciclo se introduce una variable adicional, la presión intermedia.

Entonces, se procede a analizar el comportamiento de cada uno de los refrigerantes individualmente. Mostrando gráficamente las variables de interés (COP, Q_{cond} y W_{comp} total), pudiendo analizar el comportamiento de los refrigerantes al tener un salto intermedio de presión, en cuanto a la evolución de las variables. De manera que se pueda concluir para cada caso y refrigerante el punto óptimo de condiciones de funcionamiento.

- **Resultados con AMONIACO.**

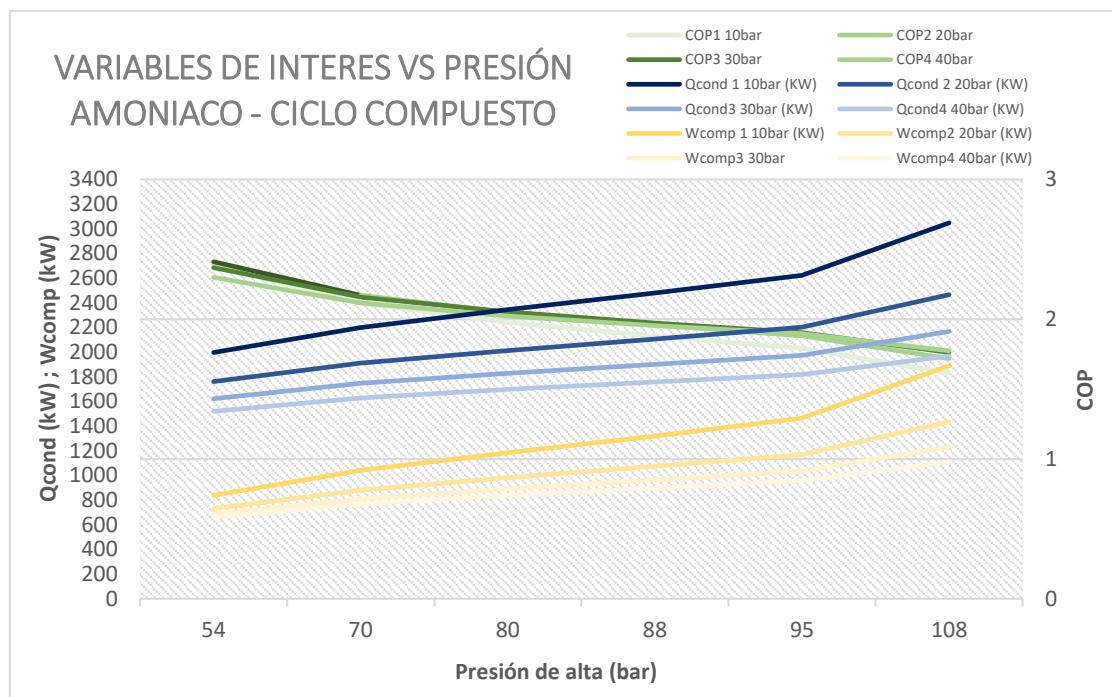


Ilustración 105. Variables de interés. Amoniaco. Ciclo compuesto.

Para realizar las simulaciones en el ciclo compuesto, se ha añadido otra variables más, la presión intermedia. En el caso del amoniaco se han simulado 4 situaciones diferentes de valor de presión intermedia.

- **Caso 1.** Presión intermedia **10 bar**
- **Caso 2.** Presión intermedia **20 bar**
- **Caso 3.** Presión intermedia **30 bar**
- **Caso 4.** Presión intermedia **40 bar**

De esta manera, se modifica el salto de presión no máximo sino en cuanto a los dos escalones que conforman el salto de presión mínima a máxima de todo el ciclo.

En cuanto a la simulación se muestran el rendimiento (COP) en los tres casos, de manera numerada como se puede ver en la leyenda. El flujo de calor cedido en el condensador y el trabajo de compresión.

En el caso de la simulación del amoniaco se destacan los siguientes aspectos.

El flujo de calor cedido en el condensador aumenta conforme aumenta la presión de compresión, destacando también que conforme aumenta el valor de la presión intermedia, el calor cedido se ve minorado, esto se debe a que el salto de presión en la etapa superior es menor. También se puede observar que la reducción de flujo de calor es menor entre los casos 2,3 y 4 que entre los casos 1 y 2 de presión intermedia.

El trabajo de compresión es mayor conforme la presión de compresión aumenta, además si la presión intermedia es menor este también aumenta. Destacando también que el salto entre casos 1 y 2 de presión intermedia es más notable que entre los casos 2,3 y 4.

En cuanto al rendimiento la evolución es casi idéntica, destacando que a bajas presiones (<70bar) el COP es mayor en el caso 3 de presión intermedia (30bar) mientras a partir de 70 bar los casos 2,3 y 4 se solapan, el caso 1 es el que peor rendimiento tiene y se ve reducido en mayor medida. Esto significa que el rendimiento es mejor para el caso 3 de presión intermedia (30bar).

- **Resultados con AGUA.**

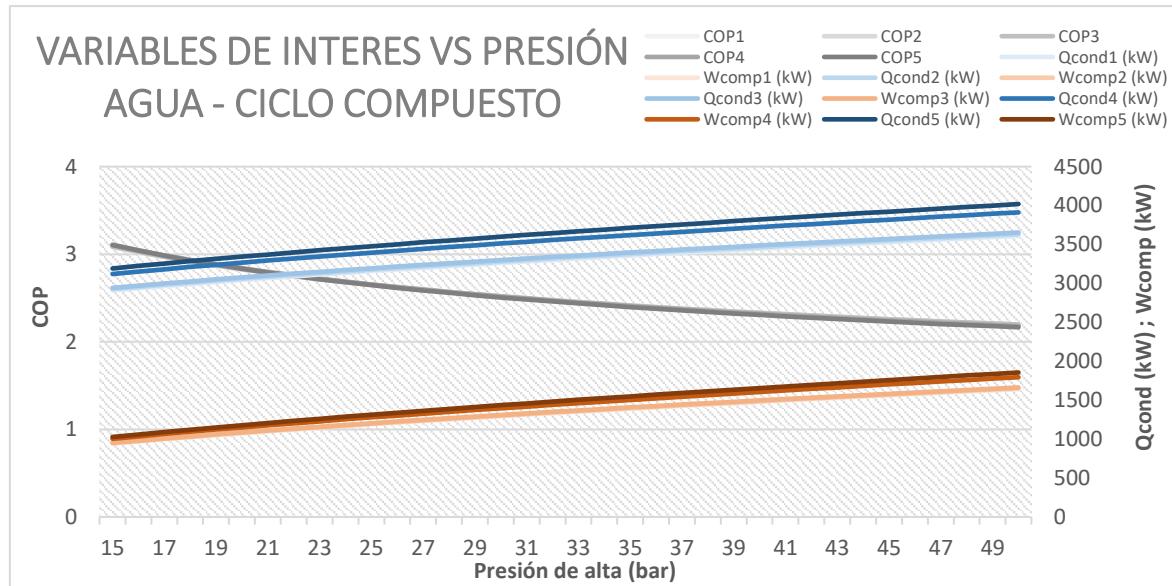


Ilustración 106. Variables de interés. Agua. Ciclo compuesto.

En el caso del amoniaco se han simulado 4 situaciones diferentes de valor de presión intermedia.

- **Caso 1.** Presión intermedia **9 bar**
- **Caso 2.** Presión intermedia **8.5 bar**

- **Caso 3.** Presión intermedia **8 bar**
- **Caso 4.** Presión intermedia **4 bar**
- **Caso 5.** Presión intermedia **3 bar**

En el caso de la simulación del agua el primer aspecto que se puede destacar es que las curvas del rendimiento (COP) se solapan en los 5 casos de presión intermedia. Con una evolución decreciente y una pendiente que se vuelve más tendida conforme aumenta la presión.

En cuanto al trabajo de compresión, este es creciente con el aumento de la presión, y en los 5 casos de presión intermedia prácticamente se produce solape, destacando que el caso 3 (8bar) el trabajo de compresión es el menor de todos los casos.

Por otro lado, el flujo de calor evoluciona de manera creciente conforme aumenta la presión de compresión, a su vez, es mayor conforme se reduce la presión intermedia hasta alcanzar su valor máximo para el caso 5, 3 bar de presión intermedia.

En cuanto a nivel térmico, este es mayor debido a que se trabaja con presiones más elevadas, también el flujo de calor es bastante mayor respecto al caso del ciclo simple (4000kW frente a 2700kW). Por último, el rendimiento se ve bastante mejorado respecto al caso del ciclo simple, pues llegando a niveles térmicos más elevados, y dando la posibilidad de aplicar a procesos de mayor requerimiento de calor, se consigue mantener el COP > 2, en todo el rango de simulación.

De cara a la optimización este ciclo consigue llegar a un nivel térmico superior manteniendo el rendimiento, lo cual aumenta el interés de su aplicación a nivel industrial.

- **Resultados con PENTANO.**

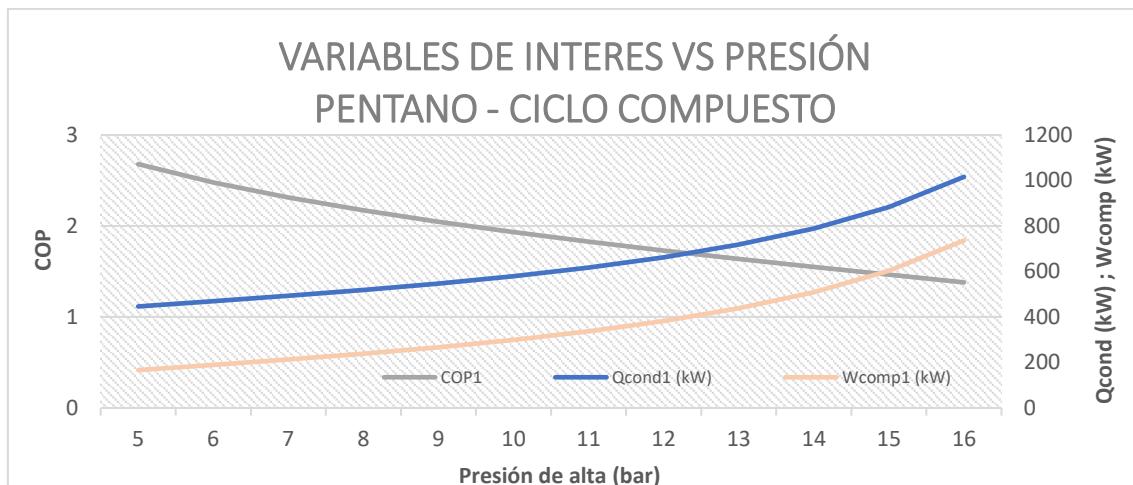


Ilustración 107. Variables de interés. Pentano. Ciclo compuesto.

En el caso del pentano, se ha representado el valor de presión intermedia óptima pues los otros dos casos tienen peor rendimiento y menor flujo de calor. Careciendo de interés su representación.

- **Caso 1.** Presión intermedia 1.25bar.

En cuanto a los resultados de la simulación, el rendimiento se ve mejorado respecto al caso del ciclo simple pero tampoco en una medida destacable. Lo que se puede destacar es el aumento notable de flujo de calor y el rango de presiones simuladas.

Para el ciclo compuesto con el propano se puede llegar a un mayor nivel térmico, aumentando el interés de su aplicación en un mayor número de procesos.

Sin embargo, en comparación con el amoniaco y el agua sigue siendo bastante inferior en cuanto a prestaciones.

- **Resultados con PROPANO.**

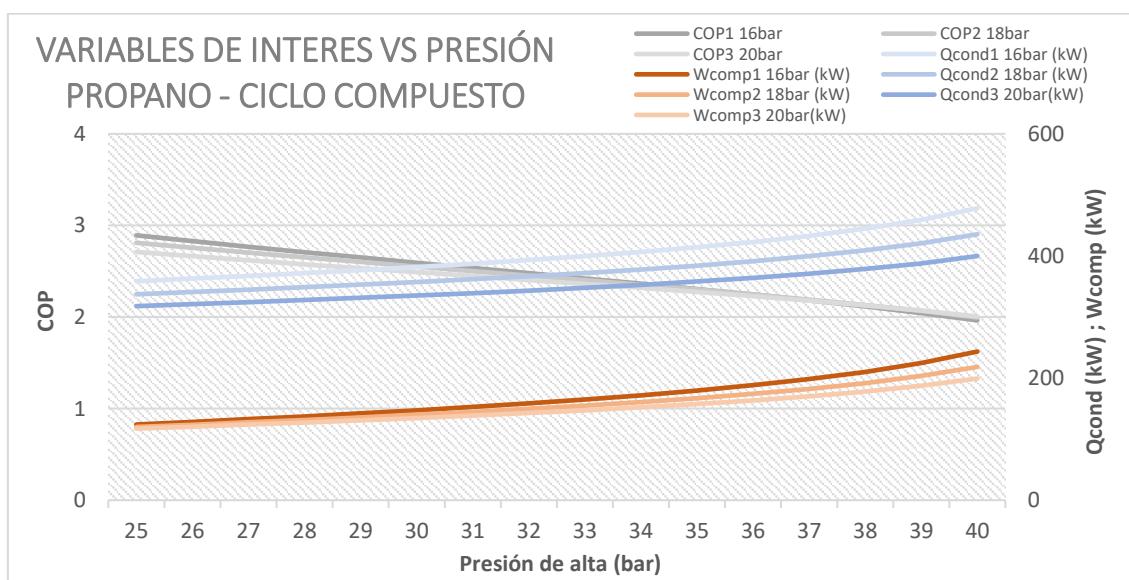


Ilustración 108. Variables de interés. Propano. Ciclo compuesto.

En el caso del propano, las simulaciones se representan para 3 situaciones diferentes de presión intermedia:

- **Caso 1.** Presión intermedia 16 bar
- **Caso 2.** Presión intermedia 18 bar
- **Caso 3.** Presión intermedia 20 bar

Los resultados que se muestran resaltan los siguientes aspectos. El primer resultado destacable es el solape de las curvas de rendimiento, destacando que para las presiones más bajas de la simulación el mayor rendimiento se da para la presión intermedia en el caso 16 bar, y también destacar que el COP es mayor en este caso que en el del ciclo simple, no bajando de COP=2 en todo el rango simulado.

En cuanto al trabajo de compresión y el flujo de calor, ambos evolucionan de manera similar para los distintos casos de presión intermedia, y de manera creciente con el aumento de la presión de alta. Destacando para el flujo de calor un mayor nivel en el caso de menor presión intermedia, de nuevo, debido a un mayor salto del compresor de alta y una menor refrigeración intermedia. Lo que aumenta el nivel térmico alcanzado.

Para procesos de menor nivel térmico, este refrigerante también es interesante, en mayor medida que el pentano, pues mantiene buen rendimiento y tiene un flujo de calor creciente. Aunque sus prestaciones lo mantienen situado por debajo del amoniaco y del agua.

Para poder hacer la comparativa entre los resultados obtenidos de manera conjunta para todos los refrigerantes, se recogen gráficamente los valores óptimos de las variables de interés, que son el rendimiento del ciclo (COP), el nivel térmico alcanzado, calor cedido en el condensador y consumo de compresor (total, suma de los dos compresores). En dos situaciones diferentes, cuando se da el rendimiento (COP) máximo y en el caso de temperatura máxima, para cada refrigerante.

Para que de esta manera, se pueda determinar el comportamiento óptimo de cada refrigerante, y así poder hacer de manera justificada la elección del refrigerante más adecuado a cada proceso industrial al que aplique.

- Caso de COP máximo.

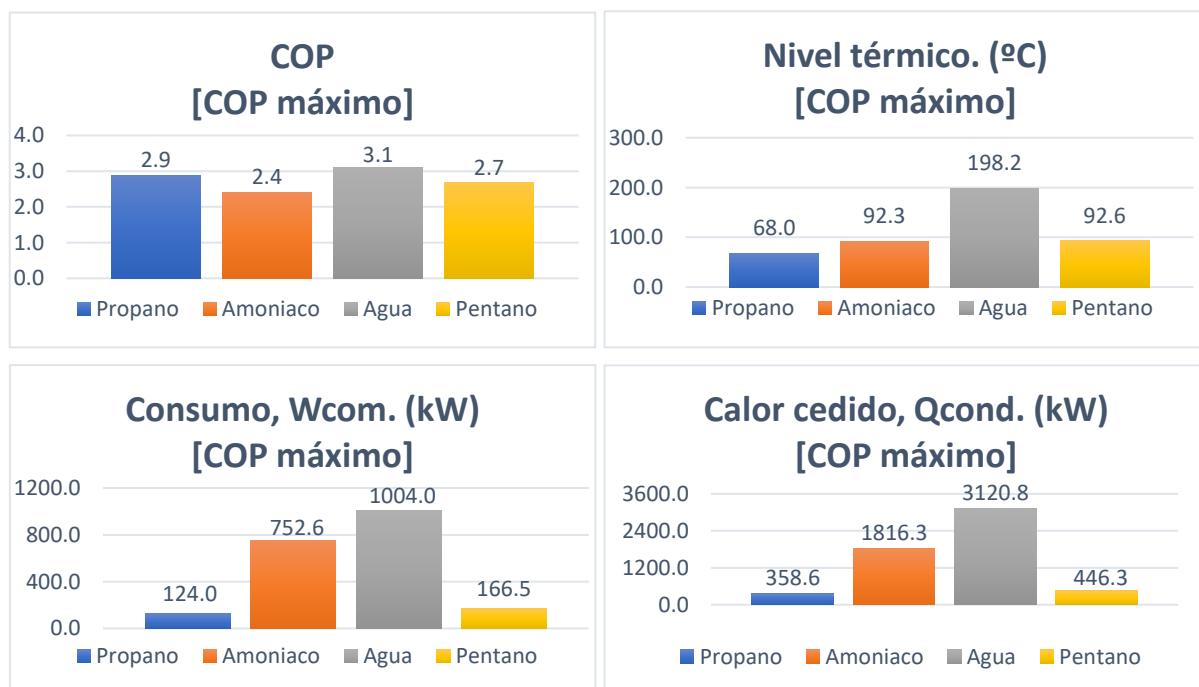


Ilustración 109. Comparativa refrigerantes COP máximo. Ciclo compuesto

En las distintas graficas mostradas se comparan los disantos refrigerantes atendiendo a los resultados de las variables de mayor interés para optimización y uso en aplicaciones industriales.

Estas gráficas corresponden con el caso de COP máximo. Donde se recoge el resultado correspondiente a cada variable, respectivo al máximo valor de rendimiento obtenido en la simulación en cada caso.

Se destacan los siguientes aspectos:

- **Rendimiento (COP).** El mejor resultado se obtiene con el agua, COP=3.1, seguido el propano, después el pentano y por último el amoniaco. Esto va en sintonía en cuanto máximo rendimiento alcanzable. Pero carece de interés si se ve de manera aislada, pues no trabajan en igual nivel térmico ni condiciones.
- **Nivel térmico.** Se muestra el nivel térmico máximo alcanzable, para el COP máximo con cada refrigerante, siendo el agua el que mayor nivel térmico alcanza, 198 °C, para el COP antes mencionado de 3.1. Esto es muy interesante, pues demuestra el alcance de un nivel térmico muy elevado con un buen rendimiento. En cuanto al pentano y al amoniaco, ambos se encuentran en un rango similar, en torno a 90°C, no siendo un nivel térmico muy elevado pero manteniendo un buen rendimiento. Por último el pentano se sitúa en torno a 60°C, nivel térmico con el que no aplica a ningún proceso de los planteados.
- **Consumo compresor y calor cedido (kW).** En cuanto al consumo del compresor, el agua es el que mayor consumo tiene y a su vez, también se sitúa en cabeza en cuanto a calor cedido en el condensador. Seguido el amoniaco, el pentano y por último el propano.

A la vista de los resultados obtenidos sitúa al agua como el refrigerante más adecuado para su aplicación en procesos de alto nivel térmico, manteniendo un rendimiento mayor y teniendo un mayor flujo de calor en el condensador. Tal y como se ha plantado, el foco frio del agua parte de 90 °C lo cual la sitúa en la posición ideal para el ciclo superior en las simulaciones del ciclo en cascada.

En segundo lugar se puede dudar entre amoniaco y propano, pues tienen buen rendimiento aunque mejor el propano, pero el amoniaco es más interesante para aplicar debido a que el nivel térmico alcanzado y el flujo de calor es mucho mayor, esto lo hace ideal para aplicar a un mayor número de procesos, el propano tiene un flujo de calor bajo en comparación lo cual puede limitar su aplicación.

El pentano, por último, es cierto que ocupa el segundo lugar en la comparativa de nivel térmico, pero su rendimiento y bajo flujo de calor lo hacen ocupar la última posición en cuanto a interés de aplicación en esta comparativa.

- Caso de temperatura máxima.

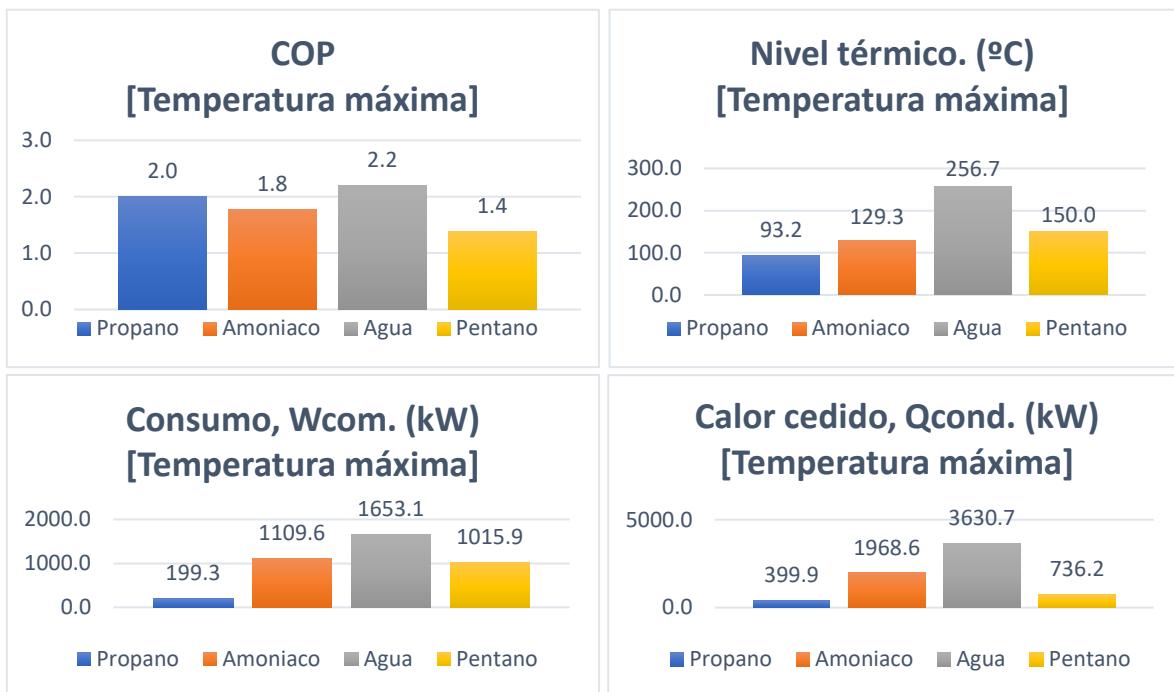


Ilustración 110. Comparativa refrigerantes nivel térmico máximo. Ciclo compuesto

Esta comparativa se realiza comparando los resultados obtenidos en la simulación respecto al máximo valor de nivel térmico alcanzado en la simulación con cada refrigerante.

Se destacan los siguientes aspectos:

- **Rendimiento (COP).** El mejor resultado se obtiene con el agua, COP=2.2, seguido el propano, después el amoniaco y por último el pentano. A la vista de estos resultados, para procesos de más alta temperatura se hace más interesante el uso del agua como refrigerante.
- **Nivel térmico.** Se muestra el nivel térmico máximo alcanzable con cada refrigerante, siendo el agua el que mayor nivel térmico alcanza, 256 °C, para un COP antes mencionado de 2.2. Esto es muy interesante, pues demuestra el alcance de un nivel térmico muy elevado manteniendo un buen rendimiento.
- **Consumo compresor y calor cedido (kW).** En cuanto al consumo del compresor, el agua es el que mayor consumo tiene y a su vez, también tiene el valor máximo de calor cedido en el condensador. Seguido el amoniaco, el pentano y por último el propano.

A la vista de estos resultados sitúa al amoniaco y al agua en cabeza, pues tienen buen rendimiento, un nivel térmico adecuado para aplicación a procesos, y mantienen un buen flujo de calor.

Por lo que, para el ciclo en cascada, lo ideal es utilizar amoniaco en el ciclo de baja, llegar al nivel térmico necesario para el agua, y en el ciclo de alta utilizar agua. De manera que se consigue buen rendimiento, el máximo nivel térmico posible en el ciclo de alta, pudiendo aplicar a casi cualquier proceso industrial de nivel térmico bajo/medio. Y a su vez mantener un flujo de calor elevado.

Estas son las conclusiones con las que se justifica la simulación final con el ciclo más complejo, el ciclo en cascada, siendo la configuración con la que se consigue llegar al nivel térmico máximo de todas las simulaciones realizadas.

Lo siguiente será optimizar ese ciclo para maximizar el rendimiento, pero el nivel térmico que se necesita se demuestra la posibilidad de alcance, y con un rendimiento considerable.

4.2.3. – Ciclo en cascada

Para este último modelo de simulación planteado, se han elegido los refrigerantes más adecuados para poder operar en serie, pues es necesario que puedan trabajar en las condiciones que este ciclo requiere.

Como se vio anteriormente, el ciclo en cascada estudiado se ha construido con dos ciclos simples en serie, donde se combina amoniaco en el ciclo inferior y agua en el ciclo superior.

Esta combinación se debe, como ya se analizó en apartados anteriores, a que el amoniaco es capaz de trabajar con rendimiento óptimo teniendo el foco frío (evaporador) a la temperatura de entorno que se ha establecido como condición de contorno. Y con el foco caliente (condensador), que a su vez es el evaporador del siguiente ciclo en serie, a la temperatura adecuada para que el refrigerante (agua) pueda llegar con rendimiento óptimo a la temperatura, en el foco caliente, deseada para poder aplicar a cualquiera de los procesos industriales comentados en la introducción a este proyecto.

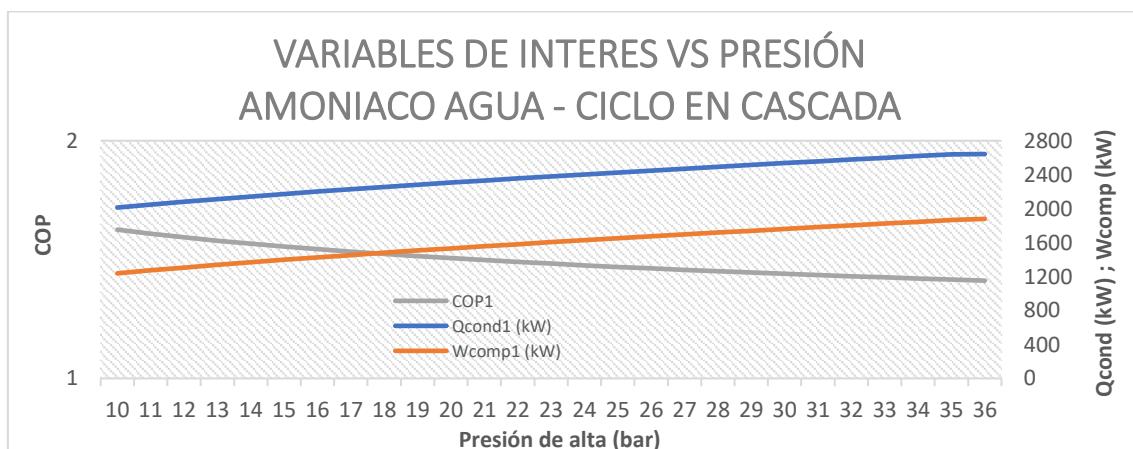


Ilustración 111. Variables de interés. Amoniaco-Agua. Ciclo en cascada.

Los resultados de las simulaciones realizadas para el ciclo en cascada grafican las curvas mostradas en la ilustración anterior. Mostrando la evolución del rendimiento, del calor cedido en el condensador y el trabajo de compresión frente a la presión de compresión de alta.

En cuanto al rendimiento, se muestra el COP global de todo el ciclo, combinación de los COP del ciclo de baja y del ciclo de alta. Su valor oscila en entre 1.7 y 1.4 en todo el rango de presiones de la simulación, decreciendo con el aumento de la presión.

A su vez, el flujo de calor cedido aumenta con el aumento de la presión de compresión, con valor máximo de 2600 kW. El trabajo de compresión acompaña el aumento del flujo de calor cedido, aumentando en mayor medida, por ello el rendimiento disminuye.

Lo siguiente es ver el nivel térmico que se consigue alcanzar, por ello en la siguiente grafica se muestra la evolución del rendimiento y el del nivel térmico frente a la presión.

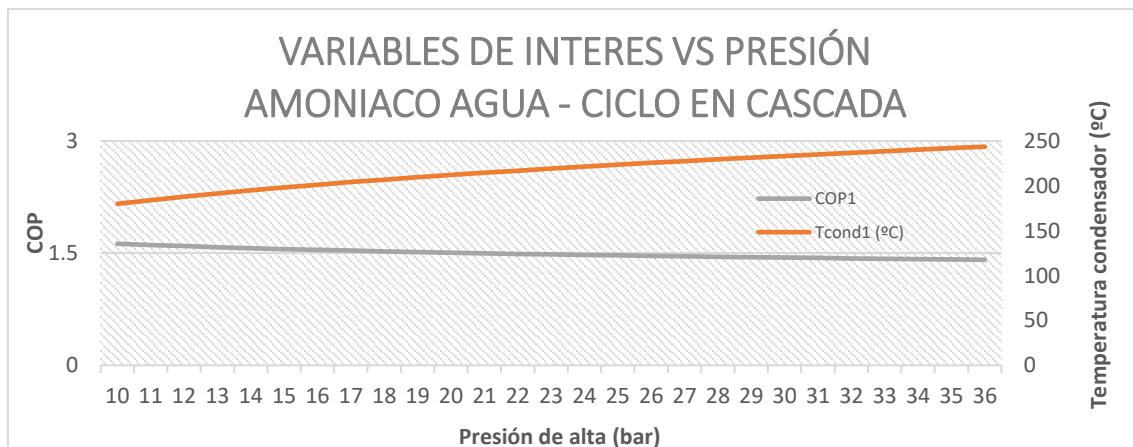


Ilustración 112. Nivel térmico-COP. Amoniaco-Agua. Ciclo en cascada.

Mientras que el nivel térmico alcanzado alcanza su máximo para el valor más alto de presión simulado, el rendimiento es mínimo situándose en torno a COP=1.4. Por lo que se consigue alcanzar 250°C para poder aplicar a cualquier proceso de los mencionados en el primer apartado de este proyecto.

En cuanto al rendimiento, se ha conseguido que no esté por debajo de 1.4, esto quiere decir que la energía introducida en forma eléctrica se multiplique por 1.4 en calor cedido en el condensador, o sea un 40% más de energía que la introducida.

Una vez que se ha conseguido alcanzar el nivel térmico deseado, lo siguiente es partir de este ciclo en cascada y optimizarlo para maximizar el rendimiento.

En el apartado final de conclusiones se comentan estos aspectos.

CAPITULO 5. Conclusiones y trabajos futuros

Se determina el éxito del proyecto, en base al cumplimiento de los objetivos establecidos y la demostración teórica de la viabilidad de aplicación a los procesos definidos con los refrigerantes y ciclos estudiados.

Para establecer las **conclusiones** del trabajo hay que atender al cumplimiento de los objetivos establecidos. En referencia al primer objetivo establecido, análisis térmico a nivel industrial, queda demostrado el éxito de este. Con el análisis del nivel térmico de los procesos industriales de mayor interés, en base al consumo energético que suponen, para justificar la aplicación del sistema con bomba de calor como fuente de generación térmica. Tras analizar los sectores y actividades industriales de mayor consumo, se encontraron procesos industriales que, con un nivel térmico bajo y medio (<250°C), suponían un alto porcentaje del consumo a nivel global (El 74% de la demanda energética global en la industria es calor, con aproximadamente un 52% del consumo en procesos de baja y media temperatura, en el capítulo 1),

Con este análisis se muestra el importante interés a nivel de consumo energético, fomentando un mayor aprovechamiento de energía eléctrica con fuente de origen renovable, y reduciendo la cantidad de emisiones contaminantes. Definiendo de manera clara los límites de aplicación del estudio.

Tras analizar el nivel térmico y la cantidad de energía consumida, justificando el interés de aplicación de este proyecto, el siguiente paso concluyó con la búsqueda exhaustiva de refrigerantes, adecuados para su uso tanto actualmente y de cara al futuro. Estudiando su comportamiento y propiedades físicas de especial relevancia para aplicar a este tipo de ciclos.

Lo primero fue plantear las propiedades que debían reunir para ser adecuado su uso en bomba de calor, el siguiente paso era analizar los distintos refrigerantes disponibles. Tras conocer los distintos refrigerantes y su aptitud para el uso industrial, se realizó un análisis de las propiedades termodinámicas de cada uno de los seleccionados y datos relevantes como su impacto ambiental y otras características. Por último se elaboró una tabla en la que se reunían los distintos refrigerantes y sus propiedades características, de manera que pudieran compararse entre sí de una manera rápida

Con el estudio realizado se justifica el cumplimiento del segundo objetivo planteado, realizar la búsqueda de refrigerantes adecuados para su uso.

Una vez conocidos los procesos industriales de interés, marcar los límites en cuanto a nivel térmico y definir los refrigerantes industriales adecuados. Lo siguiente fue estudiar los distintos ciclos térmicos con bomba de calor, definiendo una base sólida que justifica la elaboración de los distintos modelos para realizar las simulaciones

con los distintos refrigerantes escogidos, permitiendo analizar los resultados de estas y estudiar el comportamiento de cada refrigerante y ciclo.

Tras estudiar y escoger los ciclos térmicos con bomba de calor más adecuados para esta aplicación, lo siguiente fue conocer su funcionamiento y construcción. De modo que se pudieran establecer los instrumentos y elementos necesarios para su constitución, y así poder realizar modelos de simulación.

Los ciclos escogidos fueron el ciclo simple, el ciclo más básico que sirvió como primera aproximación al análisis del comportamiento de los refrigerantes, donde se obtuvieron resultados con bajo rendimiento y un nivel térmico limitado. El ciclo combinado con dos etapas de compresión y refrigeración intermedia, con el cual se buscaba mejorar el rendimiento, lo cual se consiguió, pero se seguía manteniendo el nivel térmico máximo alcanzable lejos del objetivo establecido. Por último se modeló el ciclo en cascada, a partir de dos ciclos simples en serie, con ello se consiguió maximizar el nivel térmico alcanzado y llegar al cumplimiento del objetivo establecido. Este último ciclo se simuló con los refrigerantes que dieron mejor resultado (amoníaco y agua) en cuanto a nivel térmico alcanzado, flujo de calor y rendimiento, para los ciclos simple y compuesto.

Los resultados de las simulaciones realizadas a partir de los estudios paramétricos permitieron analizar y comparar el comportamiento de los distintos refrigerantes, en base a las variables de interés definidas, principalmente COP, nivel térmico y flujo de calor, de esta manera se pudo determinar la idoneidad de cada refrigerante y ciclo para aplicación a los procesos definidos.

La comparativa de resultados se realizó a través de gráficas elaboradas donde se mostraban las variables de interés definidas, permitiendo analizar el comportamiento de los distintos refrigerantes y realizar la comparativa. Con estos resultados, se desarrolla la parte central del trabajo, donde se demuestra la posible aplicación a los procesos industriales y nivel térmico antes definidos.

En este punto quedan concluidos los objetivos definidos, ciclos térmicos con bomba de calor y estudios paramétricos.

Por último queda por definir, en base a todo lo explicado anteriormente y el análisis de los resultados obtenidos, la viabilidad futura de aplicación de este proyecto, en referencia al último objetivo, análisis de la viabilidad futura del proyecto.

Tras el análisis de los resultados y demostrar el cumplimiento de todos los objetivos definidos, se puede concluir la viabilidad teórica de aplicación a los procesos industriales definidos y nivel térmico establecido como límite. Siendo posible la electrificación a nivel industrial y dando pie a las siguientes líneas de trabajos futuros.

En cuanto a **trabajos futuros**, se plantean las siguientes líneas de trabajos futuros.

Tras haber demostrado la viabilidad teórica de aplicación de los refrigerantes definidos para electrificar procesos industriales mediante bomba de calor. El siguiente paso es materializar este planteamiento. Para ello se plantean los siguientes trabajos futuros con objeto de paso a paso conseguir el objetivo final, materializarlo y aplicarlo a nivel industrial.

Dimensionamiento teórico de los componentes de la instalación

El primer paso es tratar de dimensionar teóricamente la instalación de manera detallada. Siendo necesario llevar a cabo el dimensionamiento teórico de cada uno de los componentes de la instalación, atendiendo a las condiciones de funcionamiento definidas en el estudio teórico realizado, y definiendo las condiciones a las que están expuestos, pues estas condiciones son muy exigentes y es imprescindible dimensionarlos correctamente para cada aplicación.

Dimensionamiento teórico de una planta piloto, viabilidad técnica y económica

Tras el estudio de los componentes, sería un buen punto de partida estudiar la viabilidad de construir una instalación piloto, escalable a diferentes potencias y niveles térmicos, analizando la viabilidad técnica y elaborando un análisis económico-financiero.

Estudio de actividades industriales y procesos para aplicación de bomba de calor

También es necesario definir aplicaciones industriales que demanden calor, de manera detallada y estableciendo específicamente las condiciones de contorno para el dimensionamiento de la instalación. Por ello, otro posible trabajo futuro es analizar estos procesos detalladamente de manera que queden definidas las aplicaciones que son susceptibles de ser electrificadas con bomba de calor.

Estos trabajos futuros definidos son indispensables antes de llegar a poder aplicar a nivel industrial esta idea, pues es indispensable a la hora de poder construir una instalación real, funcional y económicamente viable.

Bibliografía

- A.Rodríguez, J. (1981). *Introducción a la termodinámica*. CECSA.
- Arnabat, I. (18 de Octubre de 2019). *Caloryfrio.com*. Obtenido de Listado de los gases refrigerantes con restricciones en el mantenimiento a partir de 2020: <https://www.caloryfrio.com/refrigeracion-frio/listado-gases-refrigerantes-restricciones-mantenimiento-a-partir-de-2020.html>
- Atlas energía. (Marzo de 2025). *Eficiencia energética en la industria según la situación del consumo energético industrial*. Obtenido de <https://atlas-energia.com/blog/eficiencia-energetica-industria-segun-sectores/>
- Bohn. (12 de Noviembre de 2021). *Líder en fabricación de equipos de refrigeración*. Obtenido de <https://blog.bohn.com.mx/sistema-de-refrigeracion-y-ciclo-de-refrigeracion/>
- Climalife. (2024). *Climalife IDS Refrigeration limited*. Obtenido de Refrigerantes: <https://www.climalife.co.uk/>
- CORES. (Diciembre de 2021). *Corporación de Reservas Estratégicas de Productos Petrolíferos*. Obtenido de <https://www.cores.es/>
- Didascalia. (Septiembre de 2019). *Grado de seguridad de refrigerantes*. Obtenido de Didascalia Educational group: <https://didascalia.es/grado-seguridad-refrigerantes/>
- Empresarios del Henares. (26 de Mayo de 2025). *Periódico de la asociación Empresarios del Henares*. Obtenido de La demanda de calor industrial hasta 2030 aumentará cada año el 1,7%: <http://empresariosdelhenares.es/archive/3116/la-demanda-de-calor-industrial-hasta-2030-aumentara-cada-ano-el-17-el-calor-solar-industrial-compensa-y-mucho>
- Enerdata. (2023). *Enerdata, energía total, datos de consumo*. Obtenido de <https://datos.enerdata.net/energia-total/datos-consumo-internacional.html>
- Energías Renovables. (Abril de 2023). *El periodismo de energías limpias*. Obtenido de <https://www.energias-renovables.com/>
- Enerxia, Norvento. (27 de Julio de 2023). *Industrial, comercial and residential energy demand*. Obtenido de <https://www.norvento.com/en/blog/industrial-commercial-and-residential-energy-demand/>
- Engie. (14 de Octubre de 2021). *Soluciones a clientes*. Obtenido de El ABC de las bombas de calor en procesos industriales: <https://www.Engie.es/bombas-de-calor-en-procesos-industriales/>

Evaporadores. (12 de mayo de 2016). *Instalaciones Frigoríficas Comerciales e Industriales*. Obtenido de <https://frigoristas.wordpress.com/evaporadores/>

Exchangers, HSR Heat. (2025). *Tratamiento térmico en la industria alimentaria*. Obtenido de <https://www.hrs-heatexchangers.com/es/recursos/tratamiento-termico-en-la-industria-alimentaria/>

Fernández, G. (03 de 03 de 2024). *ORGÁNIC CHEMISTRY*. Obtenido de Destilación sencilla, fraccionada y a vacío: <https://www.quimicaorganica.net/destilacion.html>

Frigopack. (Mayo de 2023). *Refrigeración industrial*. Obtenido de <https://www.frigopack.com/la-refrigeracion-industrial-y-sus-principales-componentes-y-accesorios/>

Galiano, E. C. (s.f.). *Universidad de Jaen*. Obtenido de Material Docente Multimedia en las Áreas de Ingeniería Química: <https://www4.ujaen.es/~ecastro/proyecto/index.html>

H.Stars Group. (2025). *Bomba de calor de alta temperatura*. Obtenido de <http://heater-chiller.com.ar/2-1-high-temperature-heat-pump.html>

Hauser, E. a. (01 de 08 de 2023). *Interempresas* . Obtenido de Química - Procesos más comunes industria química: [https://www.interempresas.net/Quimica/Articulos/487933-Los-3-procesos-mas-comunes-en-la-industria-quimica-\(en-lineas-generales\).html](https://www.interempresas.net/Quimica/Articulos/487933-Los-3-procesos-mas-comunes-en-la-industria-quimica-(en-lineas-generales).html)

Instituto nacional de estadística . (2021). *Encuesta de Consumos Energéticos 2021*

K.M Adamson, T. G. (2022). High temperature and transcritical heat pumps. *ELSEVIER, Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

Keri-Marie A., T. G. (2022). High-temperature and transcritical heat pump cycles and advancements:. *ELSEVIER*, 1-9.

Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. (1 de Enero de 2025). *Materiales formativos de FP Online propiedad del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte*. Obtenido de Análisis de ciclos frigoríficos: https://sarreplec.caib.es/pluginfile.php/22372/mod_resource/content/1/15_el_ciclo_frigorifico.html

Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. (2023). *Balance energético España 1990-2023*.

Mundolatas.com. (15 de Septiembre de 2023). *Como es el proceso de la esterilización en la industria conservera*. Obtenido de

<https://mundolatas.com/como-es-el-proceso-de-esterilizacion-en-industria-conservera/>

Renovables, A. (2023). *Appa Renovables*. Obtenido de <https://www.appa.es/>

Rodríguez, S. Á. (27 de 07 de 2023). *norvento enerxía*. Obtenido de <https://www.norvento.com/en/blog/industrial-commercial-and-residential-energy-demand/>

Sierra, C. G. (2012). *Refrigeración Industrial. Montaje y mantenimiento de instalaciones frigoríficas*. Ceysa Ediciones.

SMARTGRIDSINFO.es. (26 de Marzo de 2024). *SMARTGRIDSINFO.es*. Obtenido de El sistema eléctrico español superó en 2023 todos sus récords en materia de renovables: <https://www.smartgridsinfo.es/2024/03/26/sistema-electrico-espanol-supero-2023-todos-records-materia-renovables>

Statista. (2023). *IDAE, Miteco Spain*. Obtenido de <https://www.statista.com/statistics/1365093/electricity-consumption-industrial-sector-by-segment-spain/>

Unusual, A. b. (s.f.). *Energías renovables España*. Obtenido de https://www.accionia.com/es/energias-renovables/?_adin=02021864894

Weather Spark. (30 de Octubre de 2024). *El clima y el tiempo promedio en todo el año en Valladolid*. Obtenido de [https://es.weatherspark.com/y/35791/Clima-promedio-en-Valladolid-Espana%C3%B1a-durante-todo-el-a%C3%B1o#Figures-Temperature](https://es.weatherspark.com/y/35791/Clima-promedio-en-Valladolid-Espana-durante-todo-el-a%C3%B1o#Figures-Temperature)

Zelsio equipamiento industrial. (15 de Mayo de 2025). *Suministro y equipos de refrigeración*. Obtenido de <https://www.refrigeracionzelsio.es/>

ANEXOS

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Diagrama Sankey de la energía en España 2023. Unidades ktep. (Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, 2023)	5
Ilustración 2. Distribución del consumo energético en la industria por ramas de actividad, 2021. (Instituto nacional de estadística , 2021)	6
Ilustración 3. Estructura generación eléctrica en España, año 2023. (SMARTGRIDSINFO.es, 2024)	12
Ilustración 4. Estructura generación eléctrica en España, año 2024 (SMARTGRIDSINFO.es, 2024)	13
Ilustración 5. Demanda industrial de calor a nivel global. (Energías Renovables, 2023).....	14
Ilustración 6. Pasteurización de la leche. "monografías". (Exchangers, HSR Heat, 2025).....	16
Ilustración 7. Esterilización industria conservera. (Mundolatas.com, 2023)	17
Ilustración 8. Destilación fraccionada. (Fernández, 2024)	18
Ilustración 9. Evaporador típico de una instalación frigorífica (Evaporadores, 2016)	31
Ilustración 10. Esquema de un condensador típico de una instalación frigorífica ..	31
Ilustración 11. Válvula de expansión típica de una instalación frigorífica	32
Ilustración 12. Tubería típica de circuito de una instalación frigorífica.....	32
Ilustración 13. Refrigerador intermedio típico de una instalación frigorífica (intercambiador)	32
Ilustración 14. Filtro típico de una instalación frigorífica	32
Ilustración 15. Separador de líquido típico de una instalación frigorífica.....	33
Ilustración 16. Separador de aceite típico de una instalación frigorífica.....	33
Ilustración 17. Ejemplo esquema instalación frigorífica típica.	34
Ilustración 18. Ejemplo sistema bomba de calor para alta temperatura.....	35
Ilustración 19. Bomba de alta temperatura comercial (H.Stars Group, 2025)	36
Ilustración 20. Máquina frigorífica elemental (Ministerio de Educación, Cultura y Deporte., 2025)	37
Ilustración 21. Esquema ciclo simple. (Bohn, 2021).....	38

Ilustración 22. Diagrama T, S Ciclo simple modificado. Introducción a la termodinámica (A.Rodriguez, 1981)	40
Ilustración 23. Ciclo por compresión auto-enfriada, a inyección parcial. (A.Rodriguez, 1981).....	42
Ilustración 24. Ciclo por compresión auto-enfriada, a inyección total. (A.Rodriguez, 1981).....	42
Ilustración 25. Ciclo por compresión en cascada	43
Ilustración 26. Válvula de expansión. Simbología COCO	44
Ilustración 27. Condición de caudal. Simbología COCO	44
Ilustración 28. Condensador y evaporador. Simbología COCO	45
Ilustración 29. Mezclador. Simbología COCO	45
Ilustración 30. Compresor. Simbología COCO	45
Ilustración 31. Calculador. Simbología COCO.....	45
Ilustración 32. Corriente de circuito. Simbología COCO	46
Ilustración 33. Corriente de energía. Simbología COCO	46
Ilustración 34. Corriente de información. Simbología COCO.....	46
Ilustración 35. Esquema COCO Ciclo simple	47
Ilustración 36. Tabla de unidades de operación COCO. Ciclo Simple	47
Ilustración 37.Tabla de variables de corrientes del ciclo. COCO. Ciclo Simple.....	48
Ilustración 38. Histórico clima temperatura externa en Valladolid (Weather Spark, 2024).....	49
Ilustración 39. Esquema en COCO. Ciclo de compresión múltiple.	51
Ilustración 41. Tabla de unidades de operación COCO. Ciclo con compresión múltiple.	52
Ilustración 40. Tabla de variables de corrientes del ciclo. COCO. Ciclo con compresión múltiple.....	52
Ilustración 42. Esquema en COCO. Ciclo en cascada.....	54
Ilustración 43. Tabla de parámetros e información COCO. Ciclo en cascada (superior).	54
Ilustración 44. Tabla de parámetros e información COCO. Ciclo en cascada (inferior).	55
Ilustración 45. Tabla de parámetros globales COCO. Ciclo en cascada.....	55
Ilustración 46. Variables de interés para la simulación.	56

Ilustración 47. Entradas para el estudio paramétrico. Ciclo Simple.....	58
Ilustración 48. Salidas para el estudio paramétrico. Ciclo simple.....	58
Ilustración 49. Evolución consumo de compresor frente a la presión. Ciclo simple. Propano.....	60
Ilustración 50. Evolución COP (Rendimiento).....	60
Ilustración 51. Evolución COP (Rendimiento) frente a la temperatura del condensador. Ciclo simple. Propano.....	60
Ilustración 52. Evolución de la temperatura del condensador frente a la presión. Ciclo simple. Propano.....	61
Ilustración 53. Evolución flujo de calor del condensador frente a presión. Ciclo simple. Propano.....	61
Ilustración 54. Evolución consumo de compresor frente a la presión. Ciclo simple. Amoniaco.....	62
Ilustración 55. Evolución COP (Rendimiento) frente a la presión. Ciclo simple. Amoniaco.....	63
Ilustración 56. Evolución COP (Rendimiento) frente a la temperatura del condensador. Ciclo simple. Amoniaco.	63
Ilustración 57. Evolución COP (Rendimiento) frente a la temperatura del condensador. Ciclo simple. Amoniaco.	63
Ilustración 58. Evolución flujo de calor del condensador frente a presión. Ciclo simple. Amoniaco.....	64
Ilustración 59. Evolución consumo de compresor frente a la presión. Ciclo simple. Agua.....	65
Ilustración 60. Evolución COP (Rendimiento) frente a la presión. Ciclo simple. Agua.	65
Ilustración 61. Evolución COP (Rendimiento) frente a la temperatura del condensador. Ciclo simple. Agua.	65
Ilustración 62. Evolución de la temperatura del condensador frente a la presión. Ciclo simple. Agua.....	66
Ilustración 63. Evolución flujo de calor del condensador frente a presión. Ciclo simple. Agua.....	66
Ilustración 64. Evolución consumo de compresor frente a la presión. Ciclo simple. Pentano.	67
Ilustración 65. Evolución COP (Rendimiento) frente a la presión. Ciclo simple. Pentano.	68

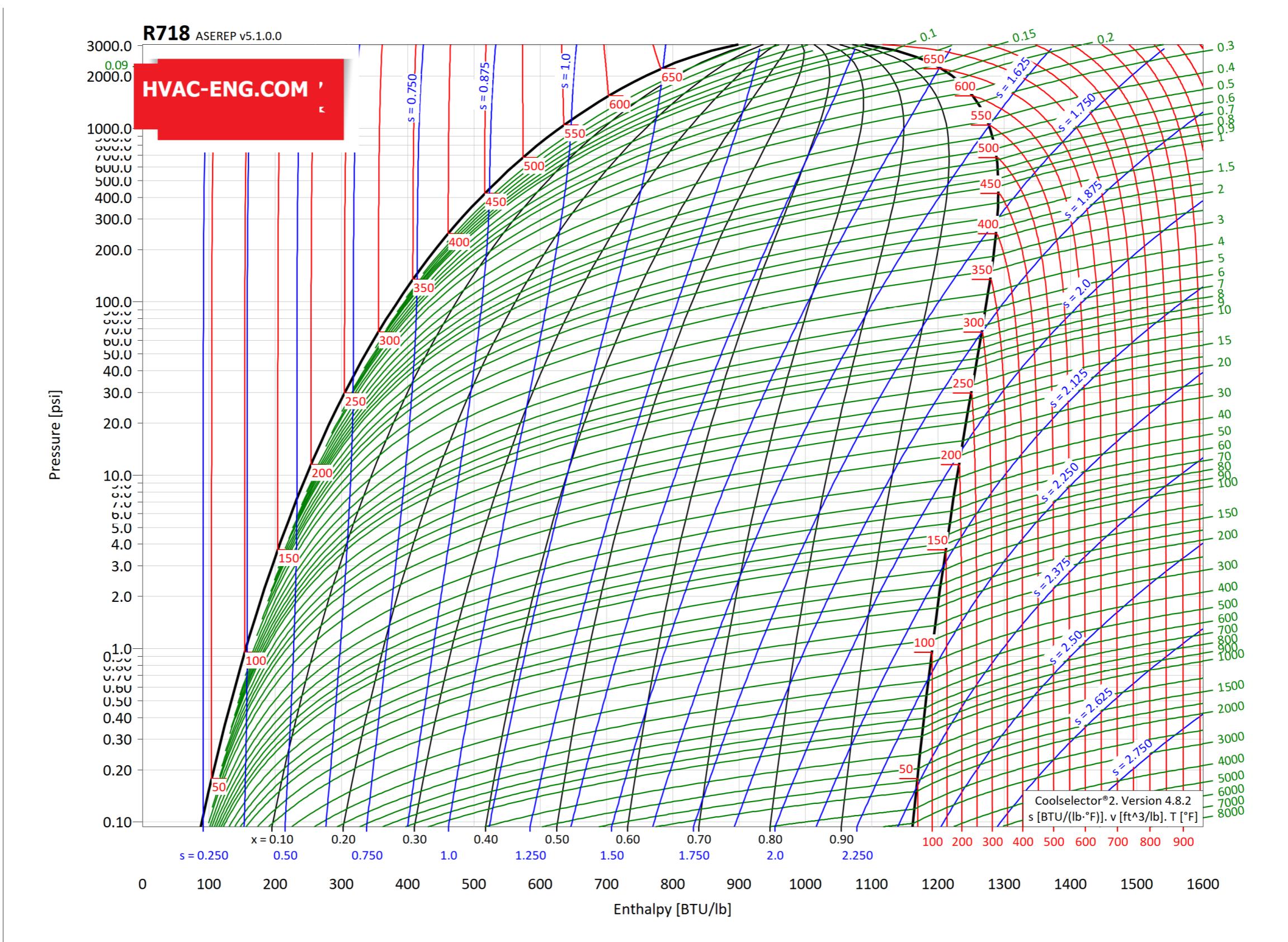
Ilustración 66. Evolución COP (Rendimiento) frente a la temperatura del condensador. Ciclo simple. Pentano.....	68
Ilustración 67. Evolución de la temperatura del condensador frente a la presión. Ciclo simple. Pentano.....	69
Ilustración 68. Evolución flujo de calor del condensador frente a presión. Ciclo simple. Pentano.....	69
Ilustración 69. Entradas. Estudio paramétrico. Ciclo compuesto.....	70
Ilustración 70. Salidas. Estudio paramétrico. Ciclo compuesto.....	71
Ilustración 71. Evolución consumo de compresor frente a la presión. Ciclo compuesto. Propano.	72
Ilustración 72. Evolución COP (Rendimiento) frente a la presión. Ciclo compuesto. Propano	73
Ilustración 73. Evolución COP (Rendimiento) frente a la temperatura del condensador. Ciclo compuesto. Propano.	74
Ilustración 74. Evolución de la temperatura del condensador frente a la presión. Ciclo compuesto. Propano.	74
Ilustración 75. Evolución flujo de calor del condensador frente a presión. Ciclo compuesto. Propano.	75
Ilustración 76. Evolución consumo de compresor frente a la presión. Ciclo compuesto. Amoniaco.....	76
Ilustración 77. Evolución COP (Rendimiento) frente a la presión. Ciclo compuesto. Amoniaco.....	76
Ilustración 78. Evolución COP (Rendimiento) frente a la temperatura del condensador. Ciclo compuesto. Amoniaco.....	77
Ilustración 79. Evolución de la temperatura del condensador frente a la presión. Ciclo compuesto. Amoniaco.....	77
Ilustración 80. Evolución flujo de calor del condensador frente a presión. Ciclo compuesto. Amoniaco.....	78
Ilustración 81. Evolución consumo de compresor frente a la presión. Ciclo compuesto. Agua.....	78
Ilustración 82. Evolución COP (Rendimiento) frente a la presión. Ciclo compuesto. Agua.....	79
Ilustración 83. Evolución COP (Rendimiento) frente a la temperatura del condensador. Ciclo compuesto. Agua.....	79
Ilustración 84. Evolución de la temperatura del condensador frente a la presión. Ciclo compuesto. Agua.....	80

Ilustración 85. Evolución flujo de calor del condensador frente a presión. Ciclo compuesto. Agua.....	80
Ilustración 86. Evolución consumo de compresor frente a la presión. Ciclo compuesto. Pentano.....	81
Ilustración 87. Evolución COP (Rendimiento) frente a la presión. Ciclo compuesto. Pentano.....	81
Ilustración 88. Evolución COP (Rendimiento) frente a la temperatura del condensador. Ciclo compuesto. Pentano.....	82
Ilustración 89. Evolución de la temperatura del condensador frente a la presión. Ciclo compuesto. Pentano.....	82
Ilustración 90. Evolución flujo de calor del condensador frente a presión. Ciclo compuesto. Pentano.....	82
Ilustración 91. Evolución consumo de compresor frente a la presión. Ciclo en cascada.....	84
Ilustración 92. Evolución COP (Rendimiento) frente a la presión. Ciclo en cascada.....	85
Ilustración 93. Evolución COP (Rendimiento) frente a la temperatura del condensador. Ciclo en cascada.....	85
Ilustración 94. Evolución de la temperatura del condensador frente a la presión. Ciclo en cascada.....	86
Ilustración 95. Evolución flujo de calor del condensador frente a presión. Ciclo en cascada.....	86
Ilustración 96. Evolución flujo molar del condensador frente a presión. Ciclo en cascada.....	87
Ilustración 97. Resultado comparativo simulación. Nivel térmico. Ciclo simple .89	89
Ilustración 98. Resultado comparativo simulación. Consumo compresor. Ciclo simple ..90	90
Ilustración 99. Resultado comparativo simulación. COP. Ciclo simple ..90	90
Ilustración 100. Resultado comparativo simulación. Flujo de calor condensador. Ciclo simple ..91	91
Ilustración 101. Variables de interés. Amoniaco. Ciclo simple.92	92
Ilustración 102. Variables de interés. Agua. Ciclo simple.93	93
Ilustración 103. Variables de interés. Pentano. Ciclo simple.....94	94
Ilustración 104. Variables de interés. Propano. Ciclo simple.....95	95
Ilustración 105. Variables de interés. Amoniaco. Ciclo compuesto.....96	96

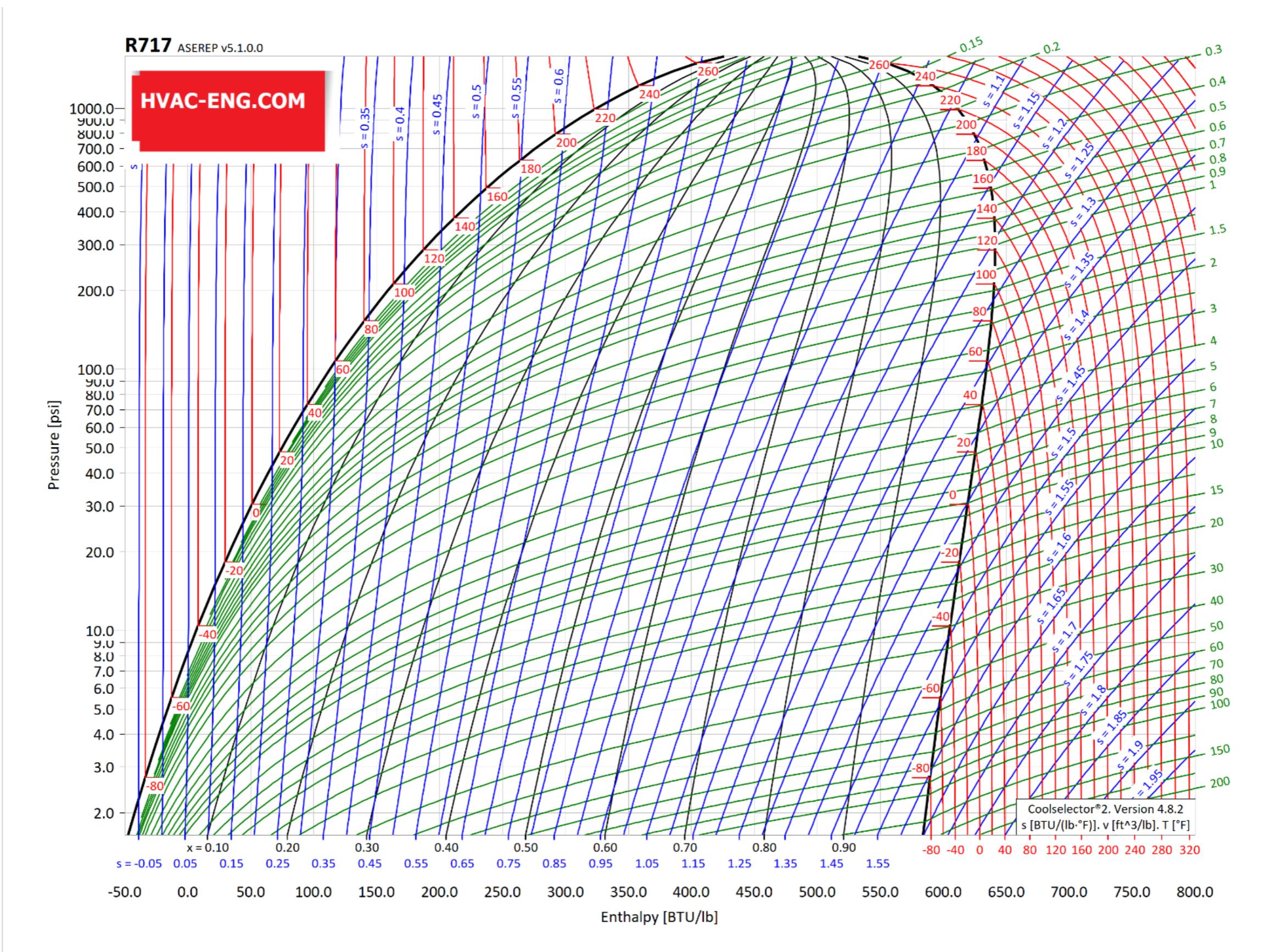
Ilustración 106. Variables de interés. Agua. Ciclo compuesto.....	97
Ilustración 107. Variables de interés. Pentano. Ciclo compuesto.....	98
Ilustración 108. Variables de interés. Propano. Ciclo compuesto.....	99
Ilustración 109. Comparativa refrigerantes COP máximo. Ciclo compuesto	100
Ilustración 110. Comparativa refrigerantes nivel térmico máximo. Ciclo compuesto	102
Ilustración 111. Variables de interés. Amoniaco-Agua. Ciclo en cascada.....	103
Ilustración 112. Nivel térmico-COP. Amoniaco-Agua. Ciclo en cascada.....	104

Diagramas de Mollier de refrigerantes

Agua



Amoniaco



Propano

