

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA INDUSTRIAL
TRABAJO FIN DE GRADO

***ANÁLISIS DE ORC Y BOMBA DE CALOR
REVERSIBLE PARA UNA PLANTA DE
REGASIFICACIÓN***

Alumno/Alumna: Septien Duoandicoechea, Mikel

Director/Directora: Arias Ergueta, Pedro Luis

Curso: 2019-2020

Fecha: BILBAO, 10 de febrero de 2020

ÍNDICE

1.	RESUMEN TRILINGUE.....	5
2.	INTRODUCCIÓN	7
2.1.	GNL (Gas Natural Licuado).....	7
2.2.	Regasificación	9
2.3.	Ciclo Rankine.....	11
2.4.	BOMBA DE CALOR REVERSIBLE.....	13
2.5.	ORC (ORGANIG RANKINE CYCLE)	14
2.5.1.	VENTAJAS Y DESVENTAJAS	15
2.5.2.	APLICACIONES	17
2.5.3.	RESTRICCIONES	17
3.	OBJETIVOS Y ALCANCE.....	18
4.	METODOLOGÍA.....	19
5.	RESULTADOS	21
5.1.	CICLO RANKINE	21
5.1.1.	PRIMER CASO	21
5.1.2.	SEGUNDO CASO	26
5.1.3.	TERCER CASO.....	30
5.2.	CICLO RANKINE CON MEZCLA DE FLUIDOS.....	34
5.3.	BOMBA DE CALOR.....	37
6.	CONCLUSIONES	43
7.	REFERENCIAS.....	44
8.	ANEXOS.....	47
8.1.	Excel RANKINE primer y segundo caso.....	47
8.2.	Excel mezcla de flúidos.....	47
.....	47
8.3.	Excel RANKINE tercer caso.....	48
8.4.	Excel bomba de calor.....	48

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Proceso de regasificación de GNL.	9
Ilustración 2: Plantas de regasificación en España.....	10
Ilustración 3: Esquema ciclo Rankine.	12
Ilustración 4: Esquema bomba de calor.	13
Ilustración 5: Comparación gráfico T-S de agua y fluídos orgánicos.	16
Ilustración 6: Programa REFPROP.	20
Ilustración 7: Rendimiento de ciclo Rankine.	22
Ilustración 8: Diagrama T-S y esquema de ciclo Rankine del primer caso.	23
Ilustración 9: Esquema del proceso de cálculo de variables en cada estado del ciclo Rankine.....	24
Ilustración 10: Diagrama T-S y esquema ciclo Rankine del segundo caso.....	27
Ilustración 11: Esquema del proceso de cálculo de variables en cada estado del ciclo Rankine del segundo caso.	28
Ilustración 12: Diagrama T-S y esquema ciclo Rankine de mezcla de fluídos del primer caso.	34
Ilustración 13: Esquema del proceso de cálculo de variables en cada estado del ciclo Rankine del segundo caso.	36
Ilustración 14: Diagrama T-S y esquema de bomba de calor.	38
Ilustración 15: COP de una bomba de calor.	38
Ilustración 16: Esquema del proceso de cálculo de variables en cada estado de la bomba de calor.	40

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1: Resultados y rendimiento del primer caso.....	25
Tabla 2: Índices GWP del primer caso.....	26
Tabla 3: Resultados y rendimiento del segundo caso.....	29
Tabla 4: Índices GWP segundo caso.....	30
Tabla 5: Tabla de resultados y rendimiento del tercer caso.....	32
Tabla 6: Índices GWP del tercer caso.....	33
Tabla 7: Resultados y COP de la bomba de calor.....	41
Tabla 8: Índices GWP de la bomba de calor.....	42

1. RESUMEN TRILINGUE

[ESP]

En este documento se presenta el estudio realizado entorno a diferentes ciclos energéticos: ciclo Rankine y bomba de calor. En este análisis se detalla cómo estos ciclos aprovechan el salto de temperaturas entre el foco frío y el foco caliente en diferentes condiciones para generar energía.

En primer lugar, se incluye un estudio informativo sobre el gas natural licuado y las plantas de regasificación en España. Con intención de aprovechar las condiciones descritas, se definen diferentes vías de aprovechamiento para estas plantas mediante la descripción del *Organic Rankine Cycle* y la bomba de calor.

En segundo lugar, se desarrollan dichos ciclos en condiciones definidas mediante el estudio de diferentes casos. Para, a continuación, proceder a evaluar el comportamiento de diferentes fluidos térmicos que cumplan las especificaciones del ciclo en el que van a operar.

Por último, se selecciona el fluido más adecuado para que sea utilizado en los diversos casos, teniendo en cuenta no sólo el rendimiento alcanzable, sino también su posible impacto medioambiental.

[EUS]

Dokumentu honetan, energia iturri bezala erabilitako ziklo desberdinetan egindako azterketak aurkezten dira: Rankine zikloa eta bero ponpa. Ikasketa hau,

baldintza desberdinetan ziklo hauek energia nola lortzen dute zehazten du, proposatzen diren temperatura jauziak, foku hotz eta bero gisa erabiliz.

Lehenengoz, gas natural likuatuaren eta Espainiako regazifikazio planten ikasketa berriemaile bat egiten da. Deskribatutako baldintzak aprobetatzeko asmoz, ustiapen bide desberdinak definitu egiten dira planta hauentzako *Organic Rankine Cycle* eta bero ponparen bidez.

Bigarrenez, entsegu batzuen bidez aipatutako zikloak garatu egiten dira baldintza batzuk definituz. Baldintza hauek betetzen dituzten jariakin termikoak aztertu ah.

Bukatzeko, errendimenduari eta ingurumen-inpaktuari erreparatuz, jariakin hoberena aukeratzeko da.

[ENG]

In the following document, a study of different energetic cycles has been carried out: the Rankine cycle and the heat pump. This analysis details how these cycles take advantage of the temperature gradient between the cold source and the hot source in different conditions in order to generate energy.

Firstly, an informative study about the liquefied natural gas and the revaporization plants in Spain is done. As a general introduction, different ways of energy production are presented, describing the Organic Rankine Cycle and the heat pump.

Secondly, the most adequate fluids for these cycles will be selected depending on the temperatures the cycle will operate between. There will be analyzed that every thermal fluid achieved every specification.

To sum up, the most suitable one will be selected, not only taking into account the corresponding cycle efficiency but also the possible environmental impact.

2. INTRODUCCIÓN

2.1. GNL (Gas Natural Licuado)

El gas natural licuado o GNL, es gas natural que ha sido procesado para ser transportado, almacenado o utilizado en forma líquida. Para llegar a este estado líquido, el gas natural extraído de los yacimientos subterráneos es tratado en varias etapas.

Una vez extraído el gas natural, se le somete a un proceso de licuefacción. Previamente se eliminan, ya que pueden crear problemas a lo largo de éste y los siguientes procesos, varios componentes como:

- Helio: Reduce aún más la temperatura de licuefacción.
- Compuestos de azufre: Son corrosivos y pueden dañar los equipos.
- Dióxido de carbono: Se solidifica en las condiciones de este proceso.
- Mercurio: Puede generar malas mediciones en los equipos y es tóxico.
- Agua: Se solidifica a las condiciones que se van a aplicar en la licuefacción.
- Hidrocarburos pesados: Pueden congelarse al igual que el agua y crear problemas en los equipos.

Como siguiente paso, el gas natural se enfría hasta la temperatura de $-161\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esa es la temperatura aproximada en la cual el metano, que es el gas primario, se convierte en líquido. Para que esto ocurra el gas natural es sometido a un proceso de refrigeración. En este proceso se utilizan refrigerantes como el propano, etano / etileno, metano, nitrógeno o mezclas de ellos previamente comprimidos y en estado líquido que se irán evaporando a medida que vayan intercambiando calor con el gas natural, el cual se enfriará hasta la temperatura antes mencionada, convirtiéndose en líquido. Los

principales países donde se ubican plantas de licuefacción y refrigeración en la actualidad son Qatar, Emiratos Árabes, Malasia, Indonesia, Argelia, Nigeria, Australia, Trinidad y Tobago, Egipto y, en Europa, Noruega.

Licuar el gas natural de esta manera nos permite poder transportarlo o almacenarlo en un volumen 600 veces menor que en fase gaseosa y a presión atmosférica. De hecho, ésta es la mejor opción para transportarlo desde regiones aisladas, ya que las importantes reservas de gas natural que existen en nuestro planeta están a veces situadas en zonas alejadas, que carecen de demanda local y no es económicamente rentable comercializar ese gas directamente y desde donde, dada su lejanía, el transporte del gas natural a través de gasoductos no es rentable.

Los buques especializados en el transporte del gas natural licuado, también llamados Metaneros, pueden ser de dos tipos: De sistema de contención del tipo membrana, de modo que tienen un aspecto muy similar al de otros cargueros, el 40% de los metaneros actuales son de este tipo, o de un sistema de contención de carga más particular, que incluye cuatro o más tanques esféricos grandes, llamados también tipo Moss. La propulsión de estos buques se realiza aprovechando el gas evaporado en los tanques, de manera que una pequeña cantidad de vapor se disipa por ebullición, en un proceso que se denomina "autorrefrigeración". Aunque recientemente han ido evolucionando a motores que puedan consumir también fuel-oil. La capacidad de carga de estos buques

puede variar entre los 25.000 m³ y los 270.000 m³. Un buque de 138.000 m³ de GNL transporta unos 900 GWh de gas licuado.

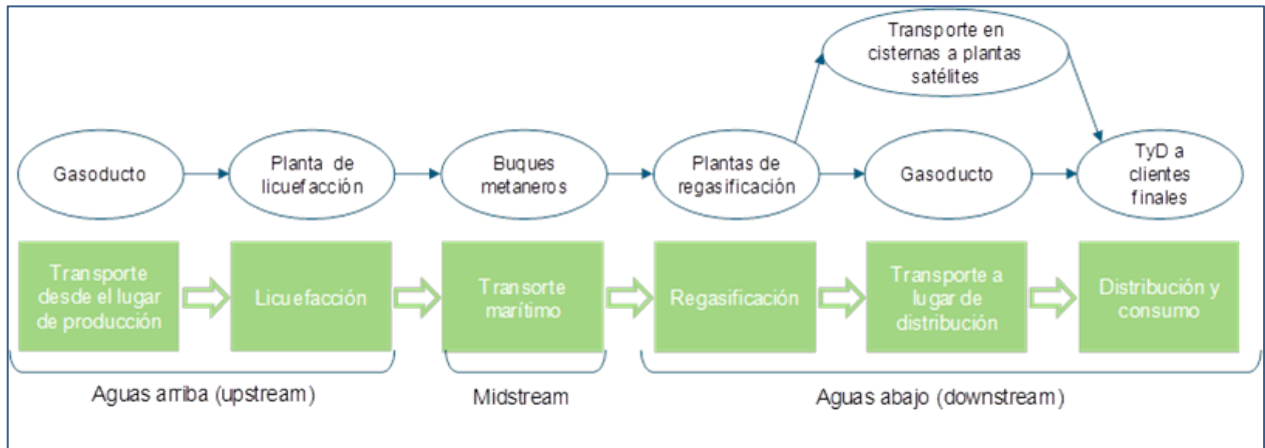


Ilustración 1: Proceso de regasificación de GNL.

2.2. Regasificación

Cuando el buque metanero llega a la planta de regasificación, la descarga del GNL transportado se realiza a través de los brazos de descarga, con los que se bombea el GNL directamente a los tanques de las plantas para su almacenamiento. Para su inyección en la red de gasoductos, el GNL almacenado en los tanques se convierte en gas en las plantas de regasificación mediante un aumento de su temperatura, pasando de unos -161 °C a unos 0-10 °C (proceso conocido como vaporización, normalmente mediante el aprovechamiento de la temperatura del agua del mar en intercambiadores de calor.) Por último, la estación de regulación, medición y odorización procesa el gas para hacer posible la detección rápida de fugas.

El sistema gasista español dispone del conjunto de infraestructuras de regasificación de GNL más importante de Europa. En la actualidad, del total de 22 plantas de regasificación en operación en Europa, siete de ellas (una aún no operativa) están

ubicadas en España, y suman el 35% de la capacidad de almacenamiento total de plantas de GNL en Europa.



Ilustración 2: Plantas de regasificación en España.

Las plantas operativas en España son:

- Barcelona, 8 tanques y una capacidad de 760.000 m³ GNL
- Huelva, 5 tanques y una capacidad de 619.500 m³ GNL
- Cartagena, 5 tanques y una capacidad de 587.000 m³ GNL
- Bilbao (BBG), 3 tanques y una capacidad de 450.000 m³ GNL
- Sagunto (Sagass), 4 tanques y una capacidad de 600.000 m³ GNL
- El Ferrol (Reganosa), 2 tanques y una capacidad de 300.000 m³ GNL

La séptima todavía no está operativa, situada en El Musel (Asturias) y equipada con dos tanques de una capacidad de almacenamiento total de 300.000 m³ GNL.

Las plantas de Barcelona, Huelva, El Musel y Cartagena son propiedad de Enagás, mientras que la de Bilbao es un 50% de Enagás y un 50% del Ente Vasco de Energía (EVE), la de Sagunto el 72.5% de la participación es de Saggas y la de Reganosa cuenta con la participación de cuatro accionistas, los cuales son el Gobierno de Galicia, Grupo Tojeiro, Sonatrach y First State regasificadora.

2.3. Ciclo Rankine

El ciclo de Rankine es un ciclo termodinámico que tiene como objetivo la conversión de calor en trabajo. Es un ciclo muy empleado en sistemas simples y cuando la temperatura de fuente caliente está limitada. El ciclo Rankine simple consta de un evaporador, un condensador, una bomba y un expansor. Utiliza un fluido de trabajo que alternativamente evapora y condensa, típicamente agua, aunque también se pueden utilizar otro tipo de fluidos como compuestos orgánicos. Éstos se utilizan en los ORC (Organic Rankine Cycle) que se describen más adelante. A continuación, se analizará brevemente los procesos que soporta el fluido térmico en un ciclo Rankine ideal simple.

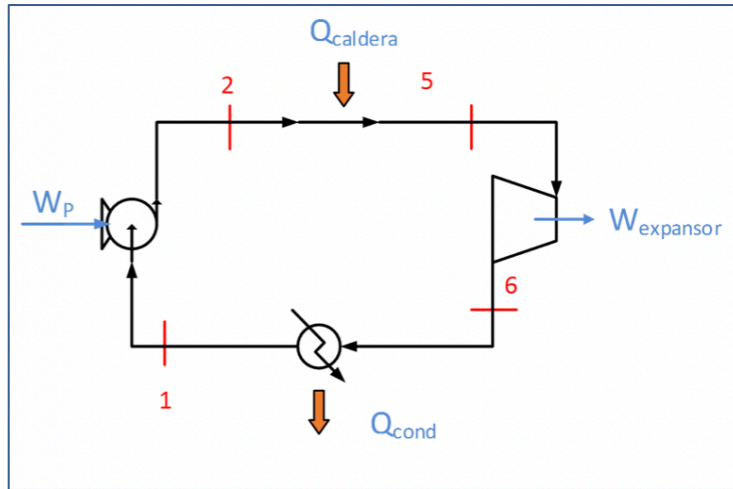


Ilustración 3: Esquema ciclo Rankine.

- **Proceso de compresión:** El fluido refrigerante entra en la bomba en fase líquida y es sometido a una compresión isentrópica, lo cual aumenta la presión del fluido hasta la presión necesaria en la caldera. Proceso 1-2 en la figura.
- **Proceso de evaporación:** A una presión constante, mediante la caldera se transmite calor al fluido. En un primer tramo del proceso el fluido de trabajo se calienta hasta la temperatura de saturación, luego tiene lugar el cambio de fase líquido-vapor y finalmente se obtiene vapor sobrecalentado. Proceso 2-5 en la figura
- **Proceso de expansión:** El vapor sobrecalentado de alta presión se expande isentrópicamente mediante una turbina, es decir baja su presión hasta la presión del condensador. Dicha turbina es la que genera la potencia mecánica del ciclo. Proceso 5-6 en la figura.
- **Proceso de condensación:** En el condensador, a una presión constante, el fluido de trabajo va transmitiendo calor y alcanza el estado de líquido saturado para poder ser bombeado de nuevo. Proceso 6-1 en la imagen.

En un ciclo Rankine real, los procesos en la bomba y en la turbina no serían isentrópicos y el condensador y la caldera presentarían pérdidas de carga.

2.4. BOMBA DE CALOR REVERSIBLE

La bomba de calor es un ciclo que toma calor de un espacio frío y lo transfiere a otro más caliente utilizando como para ello un trabajo aportado al sistema, para realizar esta transferencia de calor. Las Bombas de Calor aprovechan la capacidad que tienen los fluidos refrigerantes de ceder calor cuando pasan de estado gaseoso a estado líquido, y de absorber calor cuando realizan el proceso contrario. Para ello se modifican las propiedades termodinámicas de dicho fluido que circula dentro de un ciclo termodinámico cerrado, de manera que, variando el estado y las propiedades físicas de dicho fluido dentro de este ciclo, se consigue realizar la transferencia de calor en el sentido deseado, aportando calor a un espacio o extrayéndolo del mismo. Este ciclo pasa por 4 etapas que se producen en los 4 elementos del equipamiento del ciclo, los cuales son: Evaporador, compresor, condensador y válvula de expansión.

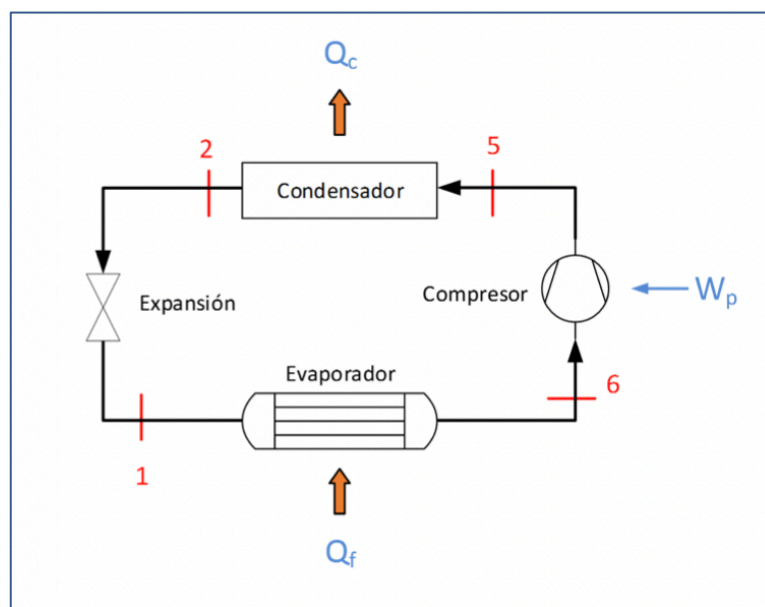


Ilustración 4: Esquema bomba de calor.

- **Proceso de evaporación:** Se produce la absorción de calor del medio ambiente, lo que conlleva la evaporación del fluido térmico de este ciclo. Este proceso se lleva a cabo a presiones bajas en un intercambiador de calor llamado evaporador. Proceso 1-6 en la figura.
- **Proceso de compresión:** El fluido refrigerante entra en el compresor ya en un estado de gas, en el cual se comprime y lo cede al ciclo a alta presión. Al aumentar la presión el líquido térmico aumenta también su temperatura. Proceso 6-5 en la figura.
- **Proceso de condensación:** El condensador absorbe el fluido a alta temperatura y presión, y va cediendo el calor al medio en el que se encuentra. Su temperatura disminuye, pero se mantiene a la misma presión el fluido térmico. Proceso 5-2 en la figura.
- **Proceso de expansión:** Este proceso sucede en la válvula de expansión del ciclo. El fluido térmico se expande, por lo que sufre una bajada de presión y también de temperatura, generándose una mezcla de líquido y vapor saturados. Proceso 2-1 de la figura.

2.5. ORC (ORGANIC RANKINE CYCLE)

Normalmente el fluido de trabajo utilizado en un ciclo Rankine es agua, pero a medida que surgen necesidades de aplicación a baja temperatura, se hace necesario plantearse utilizar nuevos fluidos de trabajo capaces de sacar provecho a estas bajas temperaturas para la producción eficiente de energía mecánica. El ciclo orgánico Rankine (ORC) tiene los mismos elementos y el mismo funcionamiento que un ciclo Rankine convencional, pero con la diferencia del fluido de trabajo empleado, que es un

fluido orgánico de elevado peso molecular y más volátil que el agua (por ejemplo hidrocarburos (HC), Hidrofluorocarbonos (HFC), Hidroclorofluorocarbonos (HCFC), Clorofluorocarbonos (CFC), Perfluorocarbonos (PFC), Siloxanos, Alcoholes, Aldehídos, Éteres, Hidrofluoroéteres (HFE), Aminas, Mezclas de fluidos...) teniendo en cuenta a la hora de seleccionarlo que, además de ciertas características técnicas, deberá tener un bajo impacto ambiental.

2.5.1. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Este tipo de fluidos, según el tipo de condiciones, otorga varias ventajas respecto al uso del agua como fluido del ciclo, por ejemplo:

- Presión de evaporación más baja que en los ciclos Rankine de vapor de agua: con eso se consigue disminuir la complejidad y por tanto el coste de la instalación. En un ORC no suele superar los 30 bar, mientras que el de vapor suele trabajar por encima de 60 bar.
- Temperatura y presión crítica reducidas: lo que hace que sea capaz de recuperar calor a una temperatura más baja de la que lo haría un ciclo convencional. Además, hace que a la entrada del condensador no se requieran temperaturas tan altas.
- Pendiente nula o positiva de la línea de vapor saturado en el diagrama T-s: Como se puede ver en la próxima figura. Algunos fluidos orgánicos tienen pendiente nula o positiva en su línea de vapor saturado. Por lo tanto, no suele haber riesgo de tener fase líquida a la salida de la turbina, por lo que la ausencia de condensación reduce el riesgo de desgaste y daño de la misma, aumentando su vida útil.

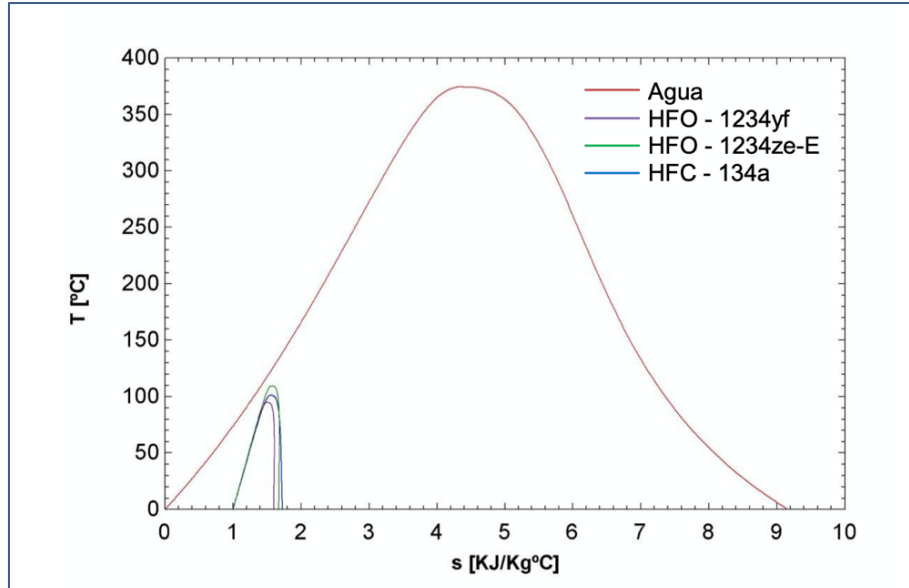


Ilustración 5: Comparación gráfico T-S de agua y fluidos orgánicos.

Como desventajas de este tipo de sistemas se puede indicar que la selección de equipamiento y del fluido orgánico depende de las condiciones de cada aplicación, por lo que, si se quiere un sistema realmente eficiente, se tendrá que diseñar para esa instalación en concreto.

Y como desventajas respecto al agua podríamos recordar que el calor latente de estos fluidos es bastante menor que el del agua. Además, este tipo de fluidos puede ser inflamable, inestable, tóxico, de coste más alto, difícil accesibilidad respecto al agua y dañino para el medio ambiente. En este último caso, habrá que tener en cuenta su GWP (global warning potential) y su ODP (ozone depletion potential).

2.5.2. APLICACIONES

Actualmente, el interés en la recuperación de calor está creciendo, por distintas razones como las económicas, la cada vez más creciente tendencia hacia la sostenibilidad y otras nuevas restricciones. Entre sus principales aplicaciones están el aprovechamiento del calor residual y la transformación de fuentes de energía renovable.

La tecnología del ciclo orgánico Rankine con fluido orgánico encuentra entre sus aplicaciones el aprovechamiento de energía solar, energía geotérmica de baja temperatura energía obtenida a partir de biomasa y la recuperación de calor residual, esta última siendo muy útil en diferentes industrias. Los ORC, como ya se ha indicado, captan calor de un foco caliente y lo transmiten a un foco frío haciendo en el proceso girar una turbina, produciendo energía mecánica que puede aprovecharse para generar energía eléctrica.

2.5.3. RESTRICCIONES

A lo largo de los años, los fluidos orgánicos utilizados para este tipo de ciclos han ido cambiando debido a las necesidades de la industria y a las restricciones generadas por los organismos gubernamentales.

En la primera generación se usaba cualquier tipo de fluido térmico con tal de conseguir el máximo rendimiento del ciclo, dichos fluidos podrían tener efectos nocivos contra la salud (tóxicos) y peligrosos para la seguridad del entorno (inflamabilidad).

Más tarde se trató de buscar nuevos fluidos más estables químicamente y con menor toxicidad. Por ello, se empezaron a utilizar los CFCs (clorofluorocarbonos), HCFCs (Hidroclorofluorocarbonos) y HFCs (hidrofluorocarbonos).

A partir de los protocolos de Montreal y de Kyoto, se fueron prohibiendo los HFCs, CFCs y HCFCs, ya que se trata de fluidos dañinos para la capa de ozono y productores de efecto invernadero. Y se comienza la búsqueda de otros refrigerantes de ODP nulo, bajo GWP y que sean de sustitución directa. La búsqueda de fluidos de trabajo alternativos se hace indispensable, ya que se prohibirá el uso de equipos con fluidos térmicos con un GWP mayor a 2500 a partir de enero de 2020, a excepción de algunos casos, no siendo de aplicación en los ORC, pero sobre los cuales se marca una serie de estrictos requisitos en cuanto a la seguridad se refiere, como, por ejemplo, la revisión periódica y rigurosa de los sistemas de detección de fugas.

3. OBJETIVOS Y ALCANCE

Uno de los retos más importantes en los ORC es la selección del fluido de trabajo más adecuado para una aplicación concreta. Por lo tanto, el objetivo de este proyecto se basa en escoger un fluido térmico orgánico óptimo para maximizar la eficiencia de un ciclo Rankine que opere entre las temperaturas de -55°C y 15°C , otro que opere entre -45°C y 30°C y por último, uno que opere entre 0 y 95°C . Y de la misma manera para una bomba de calor reversible que opera entre las temperaturas de 10°C y 85°C .

En los dos primeros casos de Ciclo Rankine, se trata de utilizar como focos fríos corrientes existentes en una planta de regasificación y en el tercero se utilizará como foco caliente una central solar térmica de vacío y como foco frío una instalación

geotérmica. Y una bomba de calor en la que el foco caliente se utilice para dar calor y calefactar un edificio (por ejemplo, el agua de los radiadores) y el foco frío sea la temperatura ambiente atmosférica.

El estudio debe incluir no sólo el rendimiento de los ciclos, sino también el impacto medioambiental generado por ellos. De este modo tendremos en cuenta el índice GWP (global warming potential) a la hora de escoger el fluido idóneo.

Para seleccionar el fluido se tendrá en cuenta también su viscosidad cinemática y su conductividad térmica para diseñar y escoger el equipamiento correcto para el ciclo, aunque en nuestro proyecto no se haya profundizado en ello.

No se van a realizar ningún tipo de estimaciones económicas de los fluidos a estudiar, ya que son ciclos para potencias pequeñas y no van a necesitar cantidades elevadas de fluido.

4. METODOLOGÍA

El programa informático utilizado para los cálculos de las variables de los fluidos a estudiar ha sido REFPROP, acrónimo de REFerence fluid PROPERTIES, fue desarrollado por el National Institute of Standards and Technology (NIST), y es una herramienta útil para evaluar numéricamente las propiedades termodinámicas de sustancias puras o mezclas de ellas. Dichas propiedades pueden estar representadas mediante tablas o gráficos que nos facilita el programa. La programación de la herramienta de cálculo fue desarrollada como una Librería de Enlace Dinámico (DLL por sus siglas en inglés) y puede

ser manipulada desde diversos recursos informáticos como: Microsoft Excel, Matlab, LabView, Python, entre otros. En nuestro caso, la versión del programa REFPROP ha sido la 10.0 con datos actualizados en el año 2018.

Las propiedades que pueden ser evaluadas incluyen: densidad, viscosidad, viscosidad cinemática, velocidad de propagación del sonido, factor de compresibilidad, presión, temperatura, entalpía, entropía, conductividad térmica entre otras. Las regiones termodinámicas que se pueden estudiar en el programa REFPROP corresponden a líquido subenfriado, región de saturación, líneas de saturación y región de gas sobrecalentado. Para el cálculo de fluidos mixtos, la composición de ellos puede ser suministrada tanto en fracción de masa como en fracción molar.

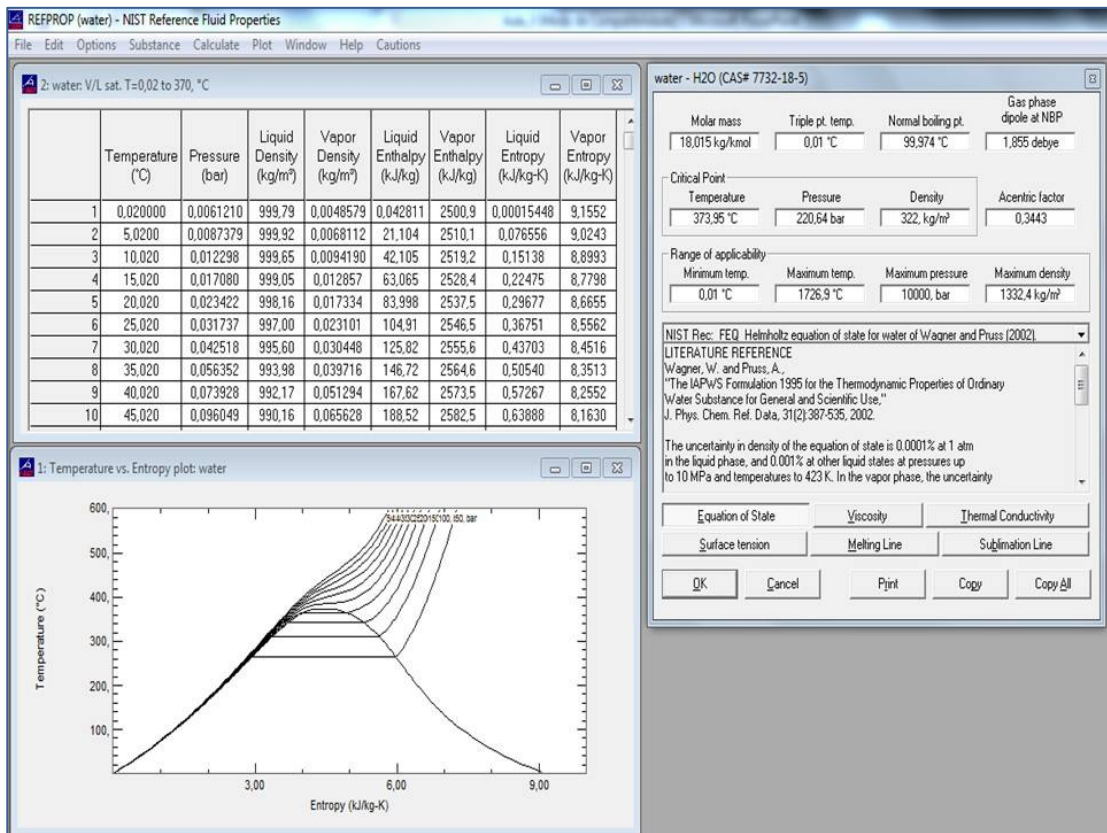


Ilustración 6: Programa REFPROP.

En nuestro caso, las variables calculadas mediante el programa han sido: presión, temperatura, densidad, entalpía, entropía, viscosidad cinemática y conductividad térmica. Datos posteriormente incorporados a tablas Excel para el cálculo del rendimiento de los ORC y de los COP de los ciclos frigoríficos, calor de vaporización, pendiente de saturación, título de fase, así como para facilitar el diseño del equipamiento.

5. RESULTADOS

5.1. CICLO RANKINE

5.1.1. PRIMER CASO

En el primer caso, se trata de aprovechar como foco frío de un ciclo Rankine las corrientes existentes en una planta de regasificación y de esta manera conseguir una generación de energía. Para hacer el análisis de la elección del fluido que se ajuste a las condiciones exigidas, plantearemos un ciclo Rankine ideal. Dicho ciclo está compuesto por cuatro procesos: dos isoentrópicos donde operan una bomba y un expansor (adiabáticos e internamente reversibles), y dos isobáricos compuestos por un condensador y una caldera que trabajan sin pérdidas.

El rendimiento de nuestro ciclo Rankine se define como la relación entre la potencia de neta producida (potencia del expansor menos potencia de la bomba) y el calor absorbido por el sistema en el hervidor. El cálculo de dichas potencias y calor recibido se puede expresar como las variaciones de entalpía que experimenta el fluido en el expansor, la bomba y el hervidor. Resumiéndose en la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{W_t}{\dot{Q}} = \frac{(H^5 - H^6) - (H^2 - H^1)}{(H^5 - H^2)} = 1 - \frac{(H^6 - H^1)}{(H^5 - H^2)}$$

Ilustración 7: Rendimiento de ciclo Rankine.

Todas las propiedades de los posibles fluidos térmicos para este ciclo necesarias para determinar los valores de las entalpías que aparecen en la expresión anterior se han calculado mediante el programa REFPROP.

En el ciclo Rankine objeto de este estudio va a operar entre un foco frío a una temperatura de -55°C (corriente de una planta de regasificación de gas natural licuado) y un foco caliente que va a ser el medio ambiente, por lo que se ha estimado que el proceso 2-5 (hervidor) se va a producir a una temperatura media aproximada que se ha estimado en 15°C . Para una velocidad de intercambio de calor razonable, tanto en el hervidor como en el condensador, se va a suponer que trabajan con un gradiente térmico mínimo de 10°C .

En cuanto a las presiones, el condensador se va a suponer que trabaja a presión atmosférica (1 bar) y que la presión máxima del hervidor viene limitada a 13 bar debido al tipo de expansor que se va a utilizar.

Por consiguiente, la primera condición para escoger el fluido puro es que su temperatura de saturación a la presión de 1 bar sea mayor que -45°C y, para poder acotar el estudio, menor que -35°C . Los cinco fluidos puros que cumplen esta especificación según REFPROP fueron R115, R161, R218, R22 y R407C.

El objetivo es seleccionar el fluido que mejor rendimiento consiga en las condiciones mencionadas, por lo tanto, el siguiente paso fue obtener las entalpías de cada estado para aplicar la fórmula anteriormente mencionada. Para ello, hemos utilizando el diagrama temperatura-entropía a modo de guía.

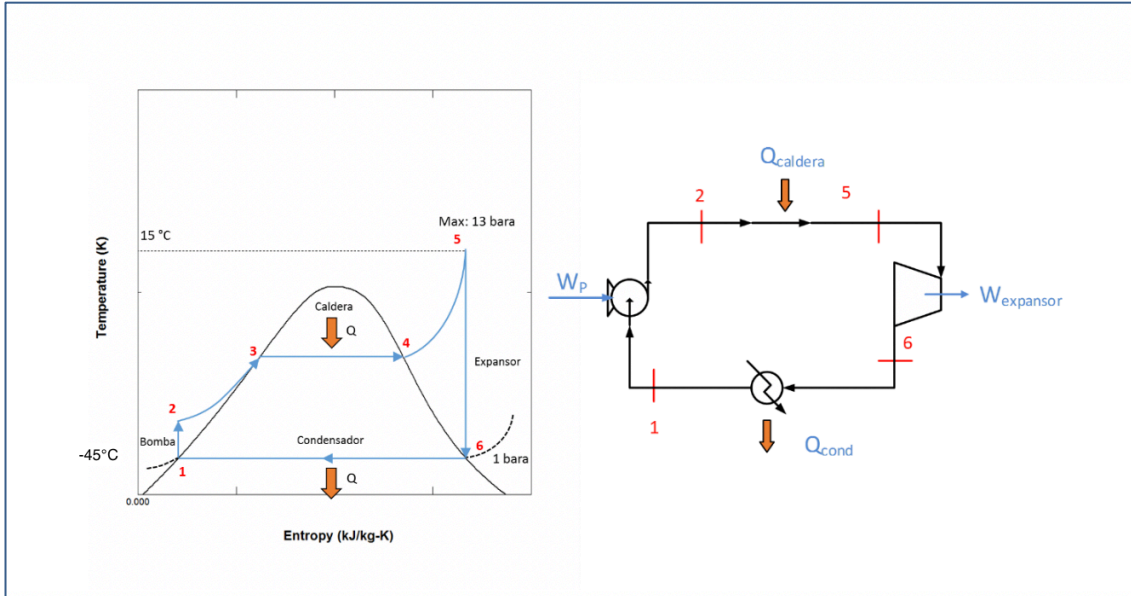


Ilustración 8: Diagrama T-S y esquema de ciclo Rankine del primer caso.

Los estados 1 y 6 corresponden a líquido saturado y a vapor saturado a presión de 1 bar y a la correspondiente temperatura de saturación, para cada fluido considerado. De modo que con dichas condiciones el programa facilita los valores de entalpía y entropía para ambos estados del fluido (h_1 , h_6 , s_1 y s_6).

El estado 5 del fluido se encuentra en la región de vapor sobrecalentado. Teniendo en cuenta que el proceso 5-6 es isoentrópico ($s_6 = s_5$) y que la temperatura en ese estado 5 tiene que ser 15°C, con estos dos datos el programa nos facilita el valor de la entalpía en el estado correspondiente a la entrada en el expansor (h_5). La única condición límite que se aplica para este estado es que la presión en el estado 5 no supere los 13 bar, tal y como ya se ha indicado, lo que viene exigido por el tipo de expansor a utilizar. Todos los fluidos estudiados satisfacen esta limitación.

Por último, el estado 2 corresponde a líquido subenfriado a la misma presión que en el estado 5 ($P_2 = P_5$) y, además, para el ciclo idealizado debe tener la misma entropía

que en el estado 1. Con estos dos datos el programa facilita el valor de la entalpía en ese estado 2 (h_2).

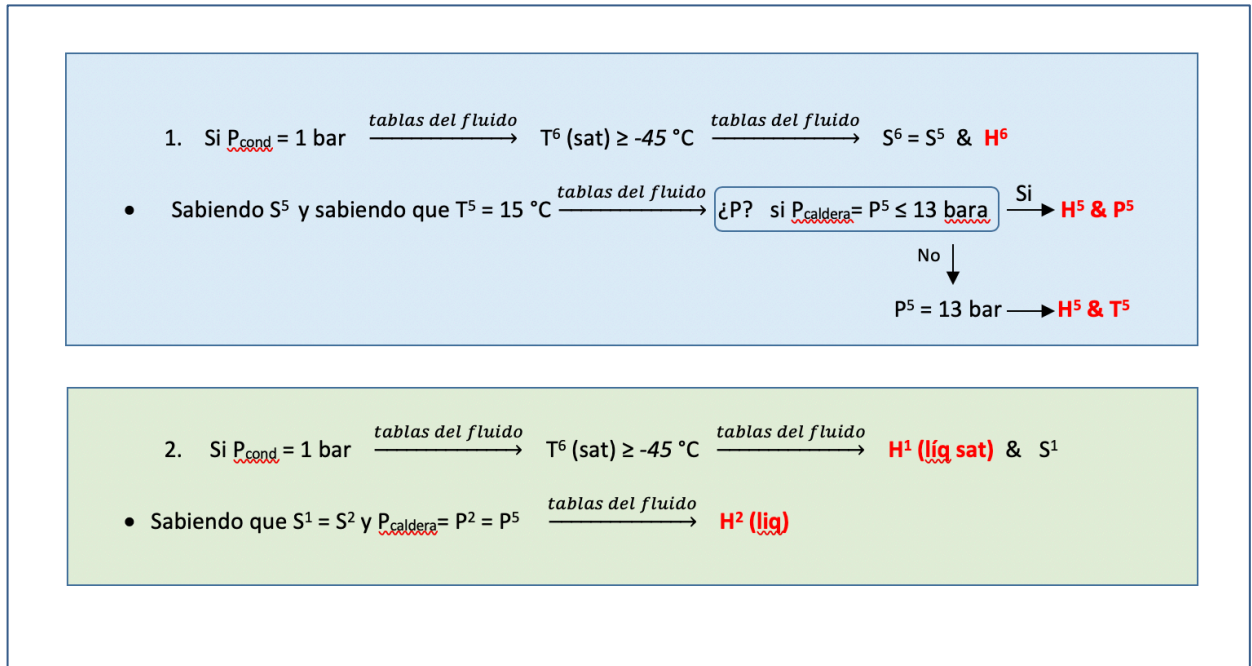


Ilustración 9: Esquema del proceso de cálculo de variables en cada estado del ciclo Rankine.

En la siguiente tabla, se han recopilado todos los datos necesarios para el cálculo del rendimiento del ciclo operando con cada uno de los fluidos seleccionados. Puede comprobarse que los dos fluidos más adecuados, por alcanzar con ellos un rendimiento máximo el ciclo, son el R115 y el R218, con rendimientos respectivos de un 15,80% y un 14,45%.

	h_1 (kJ/kg)	h_2 (kJ/kg)	h_5 (kJ/kg)	h_6 (kJ/kg)	Rendimiento (%)	s_1 (kJ/kg)/K	S_6 (kJ/kg)/K
R115	161,43	161,81	310,83	286,9	15,80	0,84856	1,3856
R161	123,4	123,71	599,56	545,37	11,32	0,70012	2,4933
R218	162,11	162,45	285,48	267,36	14,45	0,85189	1,2977
R22	153,7	153,88	418,31	387,62	11,54	0,81763	1,8257
R407C	140,33	140,57	424	389,48	12,09	0,76353	1,8345

Tabla 1: Resultados y rendimiento del primer caso.

Otro factor a tener en cuenta a la hora de seleccionar el fluido, es el índice GWP. El Global Warming Potential es una medida de la capacidad de una sustancia para contribuir al calentamiento global mediante el efecto invernadero, en comparación con un gas de referencia, el dióxido de carbono. Un GWP se calcula sobre un intervalo de tiempo específico, normalmente de 20, 100, 500 años, siendo 100 años el más habitual. En él se compara la cantidad de calor atrapado por una cierta masa de un gas en cuestión, con la cantidad de calor atrapado por una masa similar de dióxido de carbono.

	GWP (100 años)
R115	7670
R161	12
R218	8830
R22	1810
R407C	1774

Tabla 2: Índices GWP del primer caso.

Según los datos recabados sobre el índice GWP de nuestros fluidos térmicos, en caso de fuga o cualquier tipo de derrame a la atmosfera, los menos dañinos en cuanto al efecto invernadero serian el R161, seguido del R407C y R22.

5.1.2. SEGUNDO CASO

En este nuevo estudio, las condiciones de partida han sido modificadas. El fluido termoportador que se va a suministrar en el foco frio estará a -45 °C, por lo que suponemos que el fluido vector podrá alcanzar los -35 °C en el condensador. La nueva condición del foco caliente va a permitir que el fluido vector a la salida de la caldera o evaporador (punto 5) alcanzara los 30°C (T₅). Para evitar limitaciones de presión de trabajo en el expansor, el nuevo modelo nos permite alcanzar los 15,2 bar.

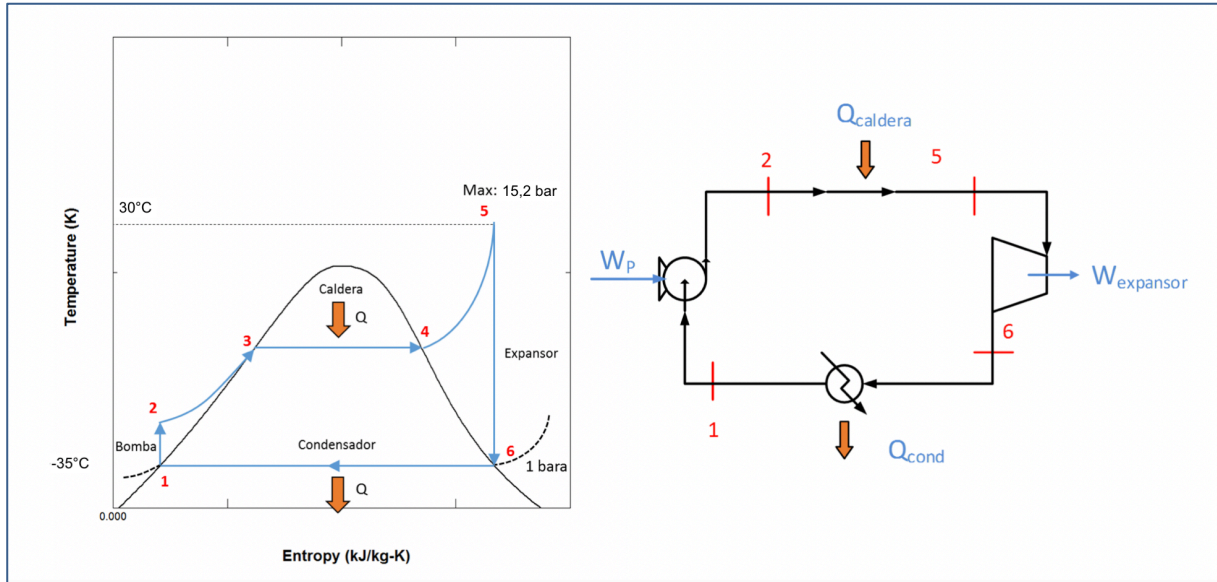


Ilustración 10: Diagrama T-S y esquema ciclo Rankine del segundo caso.

Por consiguiente, la primera condición para escoger el fluido puro es que su temperatura de saturación sea mayor que -35°C y, para poder acotar el estudio, menor que -25°C . Los siete fluidos puros que cumplen esta especificación según REFPROP fueron amoníaco, cloro, propadieno, R12, R1216, R1234yf, R1234zf.

El objetivo es el mismo que en las condiciones anteriores, seleccionar el fluido que genere el mejor rendimiento del correspondiente ciclo Rankine, por lo tanto, el siguiente paso fue obtener las entalpías de cada fase para aplicar la fórmula del rendimiento de ese ciclo. Para ello, hemos utilizado el diagrama temperatura-entropía a modo de guía. El proceso de cálculo de las entalpías sigue los mismos pasos que en el proceso anterior, pero teniendo en cuenta las nuevas condiciones. Como se puede apreciar en el siguiente esquema.

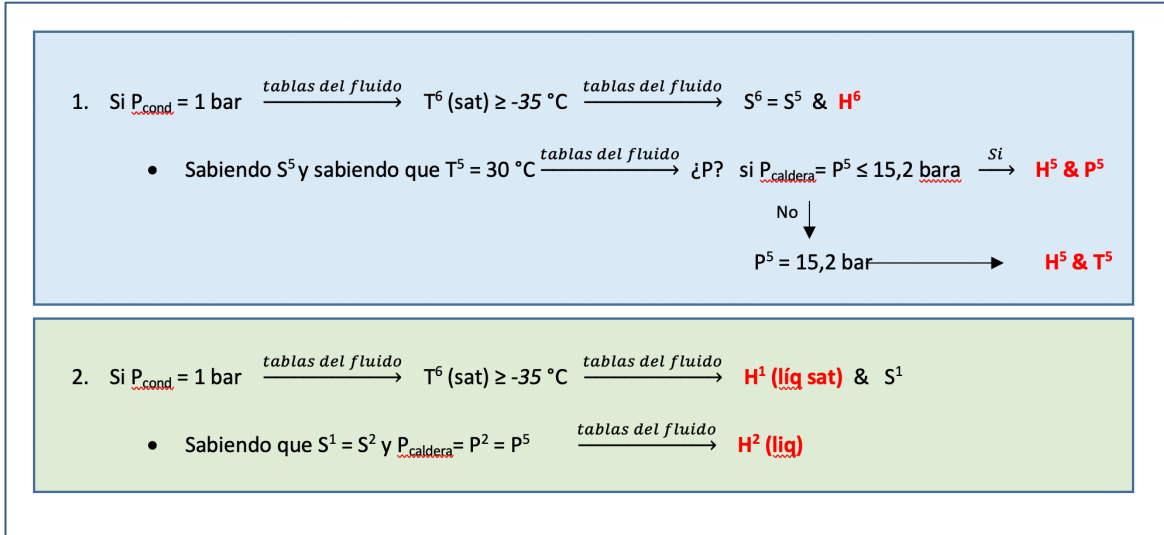


Ilustración 11: Esquema del proceso de cálculo de variables en cada estado del ciclo Rankine del segundo caso.

En la siguiente tabla, se han recopilado todos los datos necesarios para el cálculo del rendimiento del ciclo operando con cada uno de los fluidos seleccionados. Los dos fluidos con mejor rendimiento en estas condiciones son el R1216 y R1234yf, siendo este último el que mejor rendimiento genera de entre los dos. En este caso se ha calculado la pendiente de saturación y se puede apreciar que los dos fluidos con mejor rendimiento tienen una pendiente positiva. Este dato puede ser beneficioso en la salida del expansor, ya que se puede asegurar que no habrá gotas del fluido en la salida si en la entrada entra el fluido en condiciones de vapor saturado o vapor sobrecalentado.

	h_1 (kJ/kg)	h_2 (kJ/kg)	h_5 (kJ/kg)	h_6 (kJ/kg)	Rendimi ento (%)	S_1 (kJ/kg)/K	S_6 (kJ/kg)/K	Pendiente de sat. (kg/kJ)K ²
Amoniaco	193,24	193,49	1692,7	1563,7	8,59	0,89016	6,6105	-63,0211
Cloro	-0,28124	-0,18107	315,83	286,85	9,14	-0,0011	1,2007	-323,738
Propadieno	-0,68128	-0,17939	576,72	498,33	13,50	-0,0028	2,0715	-338,127
R12	172,61	172,91	368,43	338,91	14,94	0,89438	1,5785	-1872,59
R1216	165,71	166,19	334,69	306,81	16,26	0,86754	1,4494	2137,102
R1234yf	163,07	163,61	379,81	343,47	16,56	0,85763	1,5989	9775,410
R1234zf	165,88	166,33	422,13	383,24	15,03	0,86949	1,748	-3222,012
R134a	165,44	165,8	419,1	382,6	14,27	0,86756	1,7475	-1585,234

Tabla 3: Resultados y rendimiento del segundo caso.

No ha sido posible recabar datos del índice GWP de todos los fluidos estudiados en este caso, pero dentro de los estudiados el amoniaco y el R1234yf son los menos dañinos en caso de cualquier tipo de fuga en el circuito.

	GWP
Amoniaco	0
Cloro	-
Propadieno	-
R12	10900
R1216	9000
R1234yf	4
R1234zf	-
R134a	1300

Tabla 4: Índices GWP segundo caso.

5.1.3. TERCER CASO

En el tercer y último estudio de un fluido puro para un ciclo Rankine, los elementos de ciclo seguirán siendo los mismos, pero se vuelve a cambiar las condiciones de los estados de dicho ciclo.

El fluido termoportador que se va a suministrar en el foco frío (instalación geotérmica en país de clima frío) estará a 0 °C, por lo que asumimos que el fluido vector podrá alcanzar los 10 °C en el condensador, ya que se va a suponer que trabajan con un

gradiente térmico mínimo de 10 °C. Como nueva condición del foco caliente (central térmica solar de vacío), se necesita que el fluido vector no supere los 95 °C y se fijara la presión a 13 bar a la entrada del expansor.

La primera condición para escoger el fluido puro es que su temperatura de saturación sea mayor que 10 °C y, para poder acotar el estudio, menor que 20 °C. Los fluidos puros que cumplen esta especificación según REFPROP fueron óxido de etileno, R1224yd(Z), R1233zd(E) y R245fa.

El objetivo es el mismo que en las condiciones anteriores, seleccionar el fluido que mejor rendimiento genere, por lo tanto, el siguiente paso fue obtener las entalpías de cada fase para aplicar la fórmula del rendimiento de un ciclo Rankine.

El proceso seguido para el cálculo de dichas entalpías ha sido el mismo que en los anteriores. La única incidencia en los cálculos ha sido que fijando la presión de 13 bar para el estado 5, la temperatura superaba los 95 °C, por lo que se fijó 95 °C y a partir de ahí se consiguió una presión inferior a 13 bar.

	h_1 (kJ/kg)	h_2 (kJ/kg)	h_5 (kJ/kg)	h_6 (kJ/kg)	Rendimiento (%)	s_1 (kJ/kg)/K	s_6 (kJ/kg)/K	Pendiente de sat. (kg/kJ)K ²
Ethylene oxide	-0,66017	-0,23423	669,46	577,78	13,626	-0,0023234	2,0393	-303,36134
R1224yd(Z)	215,71	216,4	420,78	384,74	17,296	1,056	1,644	2148,8
R1233zd(E)	221,35	222,01	456,68	416,14	16,994	1,0756	1,7448	2859,8513
R245fa	218,81	219,55	457,56	415,76	17,251	1,0669	1,7511	2013,31658

Tabla 5: Tabla de resultados y rendimiento del tercer caso.

Como se puede apreciar en la tabla anterior, los dos fluidos con mejor rendimiento en estas condiciones son el R1224yd(Z) y R1233zd(E), con unos rendimientos muy parecidos. En este caso se ha calculado la pendiente de saturación también y se puede apreciar que los dos fluidos con mejor rendimiento tienen una pendiente positiva. Como se explica en ensayo anterior, este dato puede ser beneficioso en la salida del expansor, ya que se puede asegurar que no habrá gotas del fluido en la salida si en la entrada entra el fluido en condiciones de vapor saturado o vapor sobrecalentado.

	GWP (100 años)
Óxido de etileno	1,6
R1224yd(Z)	0,88
R1233zd(E)	1
R245fa	1030

Tabla 6: Índices GWP del tercer caso.

Obtenidos los datos de los índices GWP de cada fluido, dentro de los cuatro fluidos estudiados en este caso, los dos fluidos menos dañinos serían el R1224yd(Z) y R1233zd(E).

5.2. CICLO RANKINE CON MEZCLA DE FLUIDOS

Manteniendo las mismas condiciones externas que en el primer estudio de fluidos puros, se busca aumentar el rendimiento térmico del ciclo Rankine ideal mediante una mezcla de los dos fluidos con mejor rendimiento analizados anteriormente, el R115 y el R218.

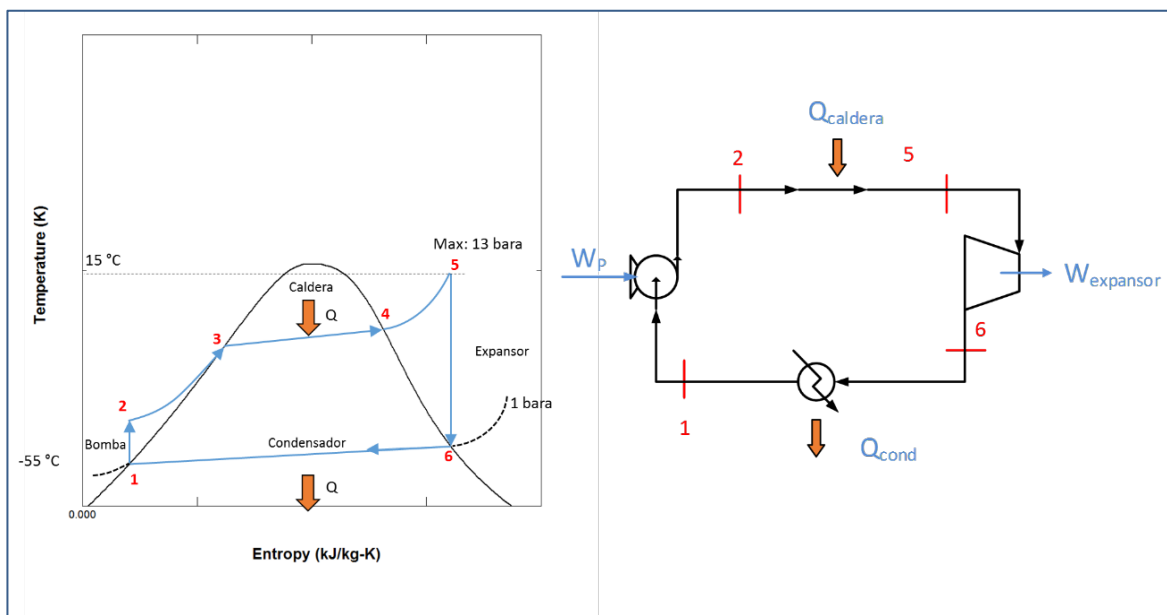


Ilustración 12: Diagrama T-S y esquema ciclo Rankine de mezcla de fluidos del primer caso.

En este caso, al ser el fluido una mezcla, el estado 1 y el estado 6 no serán isotermos por lo que se debe de estudiar los dos puntos por separado.

Ahora las condiciones de líquido saturado y vapor saturado, propias de un fluido puro, deben sustituirse por los correspondientes puntos de rocío y de burbuja de la mezcla (que se calcularán suponiendo comportamiento ideal de ambas fases: Ley de Raoult). Estos estados se corresponden con las situaciones en las que el vapor está a punto de desaparecer por evaporación la última gota de líquido, o lo que es lo mismo, cuando en el vapor está a punto de condensar la primera gota de líquido (punto de rocío) o en las que en el líquido está a punto de formarse por evaporación la primera burbuja de vapor, o lo que es lo mismo, cuando en una condensación está a punto de desaparecer por condensación la última burbuja (punto de burbuja).

Así, el estado 6 está definido por una presión de 1 bar y la temperatura o punto de rocío de la mezcla a esa presión. De modo que con estas condiciones el programa nos facilita los valores de su temperatura, entalpía y entropía (T_6 ($T_{\text{rocío}}$), h_6 y s_6).

El estado 1 también está a una presión de 1 bar y su temperatura es la del correspondiente punto de burbuja. Del mismo modo que en el estado anterior, estos datos son suficientes para que REFPROP nos indique la temperatura, entalpía y entropía del estado 1 (T_1 (T_{burbuja}), h_1 y s_1).

Para el cálculo de los estados 2 y 5 (líquido subenfriado y vapor sobrecalentado) se siguen las mismas pautas que en el análisis con fluidos puros.

Se sabe que el proceso 5-6 es isoentrópico ($s_6 = s_5$) y que la temperatura en el estado 5 tiene que ser 15°C, la única condición que se especifica es que la presión en el estado 5 no sobrepase los 13 bar, situación que se cumple en los tres tipos de mezclas

analizadas. Con estos datos el programa facilita la entalpía (h_5) necesaria para el cálculo de rendimiento.

El estado 2 se sitúa a la misma presión que el estado 5 y tiene la misma entropía que el estado 1, ya que el proceso 1-2 es isoentrópico. Dos datos los cuales bastan para que REFPROP indique la entalpía de dicho estado (h_2).

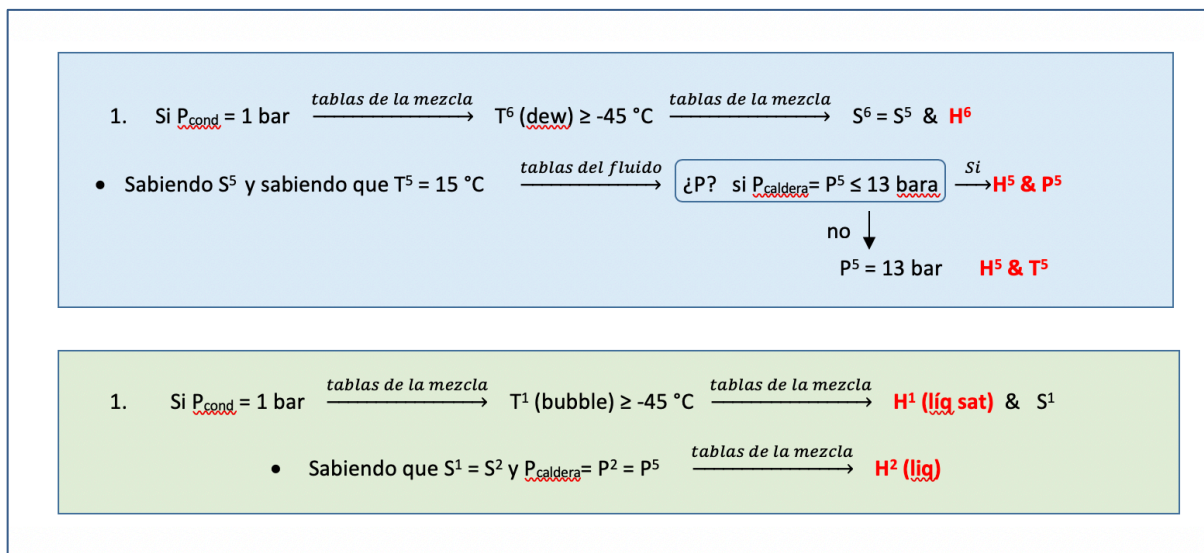


Ilustración 13: Esquema del proceso de cálculo de variables en cada estado del ciclo Rankine del segundo caso.

En la siguiente tabla, se han recopilado los datos obtenidos mediante el programa para el cálculo del rendimiento de la mezcla de los fluidos en distintas proporciones. Los porcentajes expuestos pertenecen a la fracción molar de cada fluido en la mezcla, es decir su porcentaje de moles. Como apreciación, se puede observar que la mezcla aumenta el rendimiento a la vez que el R115 aumenta. Pero el rendimiento máximo corresponde a este fluido puro.

R115/R218	h_1 (kJ/kg)	h_2 (kJ/kg)	h_5 (kJ/kg)	h_6 (kJ/kg)	Rendimiento (%)	s_1 (kJ/kg)/K	s_6 (kJ/kg)/K
50%/50%	160,77	161,14	295,43	274,51	15,30	0,84603	1,3322
75%/25%	160,88	161,26	302,38	279,99	15,60	0,84639	1,3563
25%/75%	161,12	161,48	289,86	270,35	14,92	0,84765	1,3129

5.3. BOMBA DE CALOR

En este caso estudiaremos una bomba de calor cuyo foco caliente será el interior de un edificio el cual queremos calentar y el foco frío el exterior de dicho edificio a temperatura atmosférica. Dicho ciclo está compuesto por cuatro procesos: dos isoentrópicos donde operan una válvula de expansión y un compresor (adiabáticos e internamente reversibles), y dos isobáricos compuestos por un condensador y un evaporador que trabajan sin pérdidas.

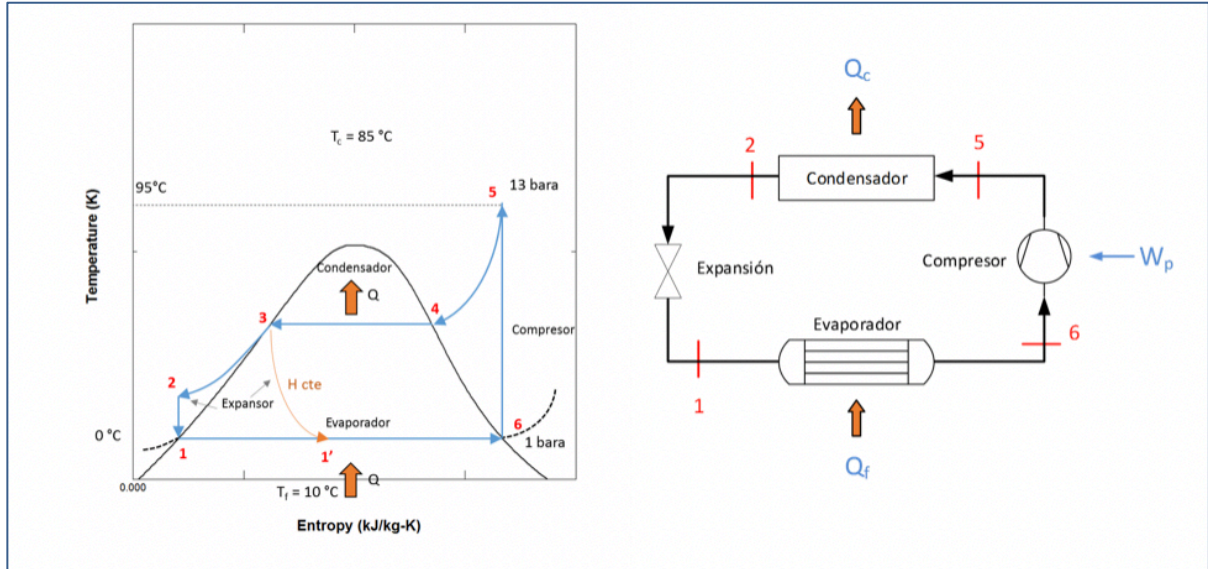


Ilustración 14: Diagrama T-S y esquema de bomba de calor.

El COP de la bomba de calor se define como la relación entre la potencia que sale de la bomba de calor como calor en el condensador, y la potencia que se suministra al compresor. Resumiéndose en la siguiente expresión:

$$\text{COP} = \frac{Q_c}{W_t} = \frac{Q_f + W_t}{W_t} = 1 + \frac{Q_f}{W_t} = 1 + \frac{H^6 - H^{1'}}{H^5 - H^6}$$

Ilustración 15: COP de una bomba de calor.

Todas las propiedades de los posibles fluidos térmicos para este ciclo necesarias para determinar los valores de las entalpías que aparecen en la expresión anterior se han calculado mediante el programa REFPROP.

En la bomba de calor objeto de este estudio va a operar entre un foco frío a una temperatura de 10 °C (el exterior del edificio) y un foco caliente que será el medio que queremos calentar (el agua de los radiadores del interior de un edificio) a una temperatura de 85 °C.

Por consiguiente, la primera condición para escoger el fluido puro es que su temperatura de saturación este entre -5°C y 5°C. Los fluidos puros que cumplieran esta especificación según REFPROP fueron 1,3-butadieno, butano, cis-Buteno, perfluorobutano, ciclobuteno, R114, R236fa y trans-Buteno.

El objetivo es seleccionar el fluido que mejor COP consiga en las condiciones mencionadas, por lo tanto, el siguiente paso fue obtener las entalpías de cada fase para aplicarlas en la fórmula anteriormente mencionada. Para ello, hemos vuelto a utilizar el diagrama temperatura-entropía a modo de guía.

Los estados 1 y 6 del ciclo corresponden a líquido saturado y a vapor saturado a presión de 1 bar y a la correspondiente temperatura de saturación. De modo que con dichas condiciones el programa facilita los valores de entalpía y entropía para ambos estados del fluido (h_1 , h_6 , s_1 y s_6).

El estado 5 del fluido se encuentra en la región de vapor sobrecalentado. Teniendo en cuenta que el proceso 5-6 es isoentrópico ($s_6 = s_5$) y que la presión en dicho estado tiene que ser 13 bar, con estos dos datos el programa nos facilita el valor de la entalpía en el estado correspondiente a la salida del compresor (h_5). La única condición límite que se aplica para el estado 5 es que la temperatura tiene que ser como mínimo 95°C,

la cual solo la satisfacen 3 fluidos: cis-Buteno, ciclobuteno y R114. Como medida preventiva, se han dado por validos los fluidos comprendidos entre 90°C y 95°C (butano y trans-Buteno), los otros tres restantes fueron desechados para los cálculos.

Por ultimo, se necesita calcular la entalpia de 1' para el calculo del COP. Sabiendo que tiene la misma presión que el estado 1 y que viene precedido por una expansión isoentálpica ($h_3 = h_{1'}$), se tendría los datos suficientes para fijar dicho punto y calcular las diferentes variables.

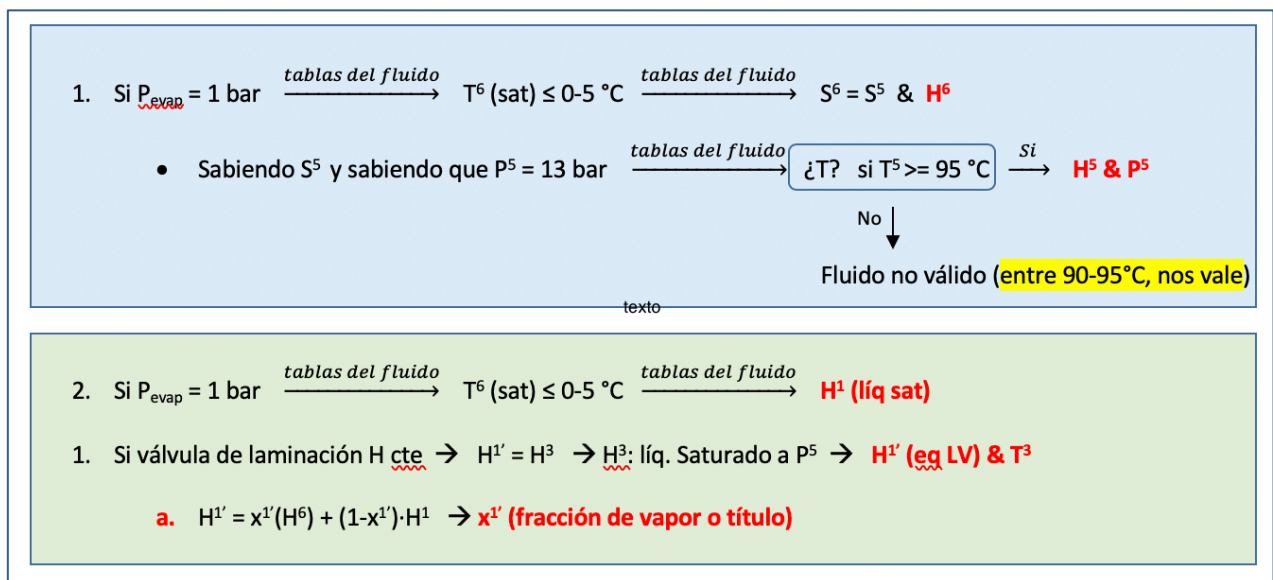


Ilustración 16: Esquema del proceso de cálculo de variables en cada estado de la bomba de calor.

En la siguiente tabla, se han recopilado todos los datos obtenidos anteriormente para el cálculo del COP del ciclo con cada uno de los fluidos seleccionados. Los dos fluidos con mejor rendimiento en estas condiciones son cis-Buteno y el ciclobuteno, con unos valores de 2,7788 y 3,0303 respectivamente. Ambos fluidos cumplen estrictamente la condición de que en el estado 5 la temperatura sea mínimo 95°C.

	h_1 (kJ/kg)	h_5 (kJ/kg)	h_6 (kJ/kg)	COP	S_6 (kJ/kg)/K	Pendiente de sat. (kg/kJ)K ²	Título(x)
Butano	438,76	682,78	584,08	2,472340426	2,4105	1164,2409	0,62353307
cis-Buteno	220,38	522,52	413,79	2,778809896	1,4964	-8627,1028	0,53342829
Ciclobuteno	185,55	548,03	428,41	3,030262498	1,5557	-1062,9758	0,43391989
R114	299,71	371,57	339,18	2,218585983	1,5036	1746,69187	0,70990739
trans-Buteno	227,03	510,44	404,75	2,681521431	1,4789	4559,40594	0,56174342

Tabla 7: Resultados y COP de la bomba de calor.

Se han obtenido los índices GWP posibles para los fluidos calculados como posible baremo de estudio medioambiental en caso de fuga del fluido. Los fluidos menos dañinos en cuanto al efecto invernadero serían butano y cis-Buteno. Aunque no ha sido posible encontrar los índices del ciclobuteno y trans-Buteno. El inconveniente adicional de estos fluidos orgánicos de la familia de los hidrocarburos es su carácter inflamable y la potencial formación de mezclas explosivas con el aire, lo que exige medidas de seguridad especiales.

	GWP (100 años)
Butano	4
cis-Buteno	20
Ciclobuteno	-
R114	9800
trans-Buteno	-

Tabla 8: Índices GWP de la bomba de calor.

6. CONCLUSIONES

En el estudio del ciclo Rankine, bajo las primeras condiciones, se puede apreciar que, en cuanto a rendimiento, el fluido R115 (seguido por el R218) es el los que presenta un rendimiento más alto. Sin embargo, estos fluidos también son los fluidos con mayor índice GWP, por lo que el uso de cualquiera de ellos, en caso de fuga, sería dañino para el medioambiente especialmente para el efecto invernadero.

En cuanto al ensayo de mezcla de fluidos entre los dos mencionados anteriormente, se puede afirmar que la mezcla no mejora resultados de rendimiento. Se ha demostrado que a mayor proporción de R115, mayor rendimiento, sin haberse detectado ninguna posible sinergia al mezclar estos fluidos.

Las nuevas condiciones para este tipo de ciclo y planteamiento (segundo caso), mejoran respecto al primer ensayo ligeramente los resultados en cuanto a rendimiento. Siendo R1216 y R1234yf los dos fluidos que superan el 16% de rendimiento (16,26 y 16,56). Entre estas dos opciones y teniendo en cuenta el GWP habría que elegir el R1234yf como fluido térmico, ya que su índice es de 4 respecto a los 9000 del R1216. Ello pone de manifiesto la necesidad de seleccionar para cada aplicación potencial el fluido o fluidos más adecuados. Como se ha podido comprobar, una variación de sólo 1º grados provoca que los fluidos más adecuados sean diferentes.

El tercer caso de fluidos puros para operar en un ciclo Rankine, teniendo unas condiciones distintas a los dos anteriores, es el que mejores resultados de rendimiento ha obtenido. El fluido R1224yd(Z) y el R1233zd(E) son los que mejores índices tienen tanto en rendimiento (17,296 y 16,994) como en GWP (0,88 y 1), por lo que la elección como fluido idóneo se podría discutir con mediante una valoración económica de los dos.

En cuanto a los cálculos en la bomba de calor, los dos fluidos térmicos con mayor COP son cis-Buteno y el ciclobuteno (2,7788 y 3,0303), que cumplen estrictamente la condición mencionada en los cálculos de $T_5 \geq 95 \text{ °C}$. No se han conseguido los datos del índice GWP del ciclobuteno, pero el índice del cis-Buteno (20) es comparativamente bajo.

7. REFERENCIAS

CRYOGENIC ORC TO ENHANCE THE EFFICIENCY OF LNG REGASIFICATION TERMINALS. IV International Seminar on ORC Power Systems, ORC2017. Elsevier. September, 2017.

ORGANIC RANKINE CYCLE FOR RECOVERY OF LIQUEFIED NATURAL GAS (LNG) COLG ENERGY. Chapter 8. Juanjiang Bao. November, 2018.

PROCESO DE LICUACIÓN DEL GAS NATURAL. Blog Sobre la industria del petróleo y gas natural. Petroblogger.com. Febrero, 2013.

<http://www.ingenieriadepetroleo.com/proceso-licuacion-gas-natural/>

MANUAL DE LA ENERGÍA. Las claves del sector energético. Energía y sociedad.

<http://www.energiaysociedad.es/manenergia/3-4-transporte-de-gnl/>

TRANSPORTE DEL GAS. Plantas de regasificación. Enagás.

https://www.enagas.es/enagas/es/Transporte_de_gas/PlantasRegasificacion

TRANSPORTE DEL GAS. Transporte y operación. Mapa de infraestructuras de Enagás en España.

https://www.enagas.es/enagas/en/Transporte_de_gas/TransporteYOperacion/MapaInfraestructuras

DESARROLLO DE UN MODELO DE CICLO ORGÁNICO RANKINE. Ejemplo de aplicación para análisis de fluidos de trabajo de bajo potencial de efecto invernadero. Marta Amat Albuixech. Julio, 2017.

http://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/170068/TFM_2017_AmatAlbuixechMarta.pdf?sequence=1&isAllowed=y

SISTEMAS ORC (ORGANIC RANKINE CYCLE) PARA RECUPERAR ENERGÍA. Tecnologías. Lancea.

<http://www.lancea.es/produccion-electricidad/orc-organic-rankine-cylcle/>

REFERENCE FLUID THERMODYNAMIC AND TRANSPORT PROPERTIES DATABASE (REFPROP). National Institute of Standards and Technology (NIST). July, 2018.

<https://www.nist.gov/programs-projects/reference-fluid-thermodynamic-and-transport-properties-database-refprop>

