

Proyecto Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Modelado y simulación de un sistema de
almacenamiento disruptivo basado en ciclos
Orgánicos Rankine combinados con
almacenamiento termoquímico.

Autor: Irene Cabello Gavira

Tutor: Manuel Antonio Silva Pérez

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

Sevilla, 2023



CENER | CENTRO NACIONAL DE
ENERGÍAS RENOVABLES
AD|tech FUNDACIÓN CENER

Proyecto Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

**Modelado y simulación de un sistema de
almacenamiento disruptivo basado en ciclos
Orgánicos Rankine combinados con
almacenamiento termoquímico.**

Autor:
Irene Cabello Gavira

Tutor:
Manuel A. Silva Pérez
Profesor contratado doctor

Dep. Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2023

Agradecimientos

Este proyecto supone el fin de una época de mi vida, la cual ha sido cuanto menos, enriquecedora. Me gustaría agradecer a todas las personas que cada vez que pensaba que no podía más, me han dado el amor y el apoyo para seguir adelante con más fuerzas y ganas. No podría empezar por otras personas que no fueran mis padres, que han sufrido esta carrera incluso más que yo. Les agradezco no solo por todo el amor recibido, sino también las charlas y las riñas que, sin ellas, a día de hoy no sería una graduada en esta carrera. Les tengo que agradecer también la educación y los valores que me han dejado como herencia, y la confianza ciega que han puesto siempre en mí, no solo a ellos sino a toda mi familia.

Tengo que dar las gracias a Carmen Rocío, María y Claudia, las tres hermanas que me dio la escuela. Sin ninguna duda que me hayan dado ellas el título de familia es con lo que me quedo de estos años. No me puedo olvidar de todos esos amigos que han estado alegrándome los días estos años, he tenido la suerte de estar muy bien acompañada.

Agradecer también a mi primo Curro, persona a la que admiro en todos los aspectos y que marca para mí un camino a seguir. Sin él, la realización de este proyecto se hubiese hecho cuesta arriba. Gracias también a Manuel Silva por todo lo que me ha enseñado como profesor y por tutorar este proyecto.

Y a Julia, gracias. Gracias por ser la persona que ha estado en todos y cada uno de mis agobios, llantos, y sufrimientos, porque gracias a ti acabaron siendo fueron pascos, risas y alegrías.

Irene Cabello Gavira

Sevilla, 2023

Resumen

El presente trabajo de fin de grado se basa en el proyecto RESTORE, planteado por el Centro Nacional de Energía Renovables (CENER). Este busca la descarbonización del sector de producción de frío y calor en Europa, que representa aproximadamente la mitad del consumo final de energía en el continente. Para alcanzar este objetivo se propone la implementación de redes de distrito de frío o calor, que utilizan instalaciones de producción de energía alternativas basadas en tecnologías renovables y/o la recuperación de calor residual. Sin embargo, estas soluciones presentan una gran desventaja debido a la dependencia de recursos intermitentes que no siempre están disponibles cuando se necesita la energía.

Para la resolución de dicho problema se propone el uso de sistemas de almacenamiento competitivos, en particular la solución Power to Heat to Power. Esta solución permite transformar la electricidad excedente de fuentes renovables en calor para su almacenamiento y posterior entrega en forma de calor o electricidad. El proyecto se enfocará en el modelado, simulación y análisis de una solución Power to Heat to Power basada en la combinación de ciclos orgánicos con un sistema de almacenamiento termoquímico, para su aplicación en redes de distrito de frío y calor.

Para lograr este objetivo, se utilizará el programa IPSEpro, que permite el modelado y simulación de ciclos de carga y descarga para el almacenamiento termoquímico. También se utilizará el programa RefProp para analizar las distintas propiedades de los fluidos utilizados en el ciclo de la bomba de calor y los ciclos orgánicos de Rankine. En definitiva, el proyecto busca diseñar una solución Power to Heat to Power eficiente y efectiva que contribuya a la descarbonización del sector de producción de frío y calor en Europa.

ÍNDICE

Agradecimientos.....	5
Resumen.....	7
Notación.....	Error! Marcador no definido.
1. INTRODUCCIÓN.....	1315
2. OBJETIVO.....	1416
3. FUNDAMENTOS.....	1517
3.1 Transición energética.....	1517
3.1.1 Problemática del cambio climático.....	1517
3.1.2 Objetivos de la Unión Europea.....	1618
3.1.3 Necesidad de la descarbonización de la producción de frío y calor.....	1720
3.1.4 Redes de distrito de frío y calor (DHC).....	1821
3.2 Necesidad de almacenamiento.....	1921
3.3 Sistemas Power to Heat to Power.....	2124
3.3.1 Almacenamiento térmico.....	2124
3.3.1 Ciclo de Potencia.....	2225
3.4 Solución propuesta.....	2428
4. METODOLOGÍA Y HERRAMIENTAS.....	2831
4.1 IPSE pro.....	2831
4.2 Refprop.....	2932
5 MODELADO Y SIMULACIÓN.....	3134
5.1 Trabajo preliminar.....	3134
5.1.1 Desarrollo de modelos adicionales.....	3134
5.1.2 Caso 1. Ciclo Base.....	3739
5.2 Caso Realizado.....	4951
5.2.1 Diseño.....	4951
5.2.2 Cargas Parciales.....	6162
6 RESULTADOS.....	67
6.1 Caso 1. Comparación de fluidos.....	67
6.2 Caso 2. Almacenamiento.....	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de refrigerantes según su inflamabilidad y toxicidad.....	6867
Tabla 2. Comparación de fluidos para ciclo de bomba de calor	7372
Tabla 3. Comparación de fluidos para ciclo orgánico de rankine	7473
Tabla 4. Comparación del COP entre distintos ciclos de bomba de calor	7776

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Model Development Kit para Intercambiador aceite-agua	3335
Ilustración 2. Model Development Kit para separador de aceite	3436
Ilustración 3. Uso de válvula de tres vías de aceite.....	3436
Ilustración 4. Model Development Kit para válvula de tres vías de aceite	3537
Ilustración 5. Model Development Kit para Calderín	3738
Ilustración 6. Ciclo de Bomba de Calor simple con Ciclopentano.....	3840
Ilustración 7. Ciclo de Bomba de Calor con sobrecalentamiento para Pentano.....	4142
Ilustración 8. Ciclo de Bomba de Calor con sobrecalentamiento y subenfriamiento para Novec649	4143
Ilustración 9. Ciclo de Bomba de Calor con regenerador para Novec649	4244
Ilustración 10. Ciclo orgánico de Rankine con sobrecalentador para Etanol	4345
Ilustración 11. Ciclo orgánico de Rankine con sobrecalentador y subenfriado para Novec 649	4648
Ilustración 12. Ciclo Orgánico de Rankine con recuperador para Novec649	4849
Ilustración 13. Ciclo de bomba de Calor simple	5152
Ilustración 14. Ciclo de Bomba de Calor con regenerador en la parte de alta temperatura para Novec649	5152
Ilustración 15. Ciclo de Bomba de Calor con regenerador en la parte de baja temperatura para Novec649	5253
Ilustración 16. Ciclo de Bomba de Calor con dos regeneradores para Novec649	53
Ilustración 17. Ciclo de Bomba de Calor con regenerador conectado a parte de alta y a la de baja temperatura.	5354
Ilustración 18. Ciclo de Bomba de Calor con dos regeneradores para Novec649 reaprovechando aceite y agua	5655
Ilustración 19. Ciclo Orgánico de Rankine aprovechando aceite en el evaporador	5756
Ilustración 20. Ciclo Orgánico de Rankine aprovechando aceite precalentando agua.....	58
Ilustración 21. Ciclo Orgánico de Rankine aprovechando aceite en evaporador y precalentando agua	5958
Ilustración 22. Ciclo Orgánico de Rankine con dos condensadores y aprovechando aceite.....	61
Ilustración 23. Ciclo Final de Bomba de Calor a Carga Parcial.....	6463
Ilustración 24. Ciclo Orgánico de Rankine Final a Carga Parcial.....	6665
Ilustración 25. Campana de saturación y ciclo HP del amoníaco	7069
Ilustración 26. Campana de saturación y ciclo HP del buteno.	7069
Ilustración 27. Campana de saturación y ciclo HP del isobuteno.	7170
Ilustración 28. Campana de saturación y ciclo HP del etanol.	7271
Ilustración 29. Campana de saturación y ciclo HP del tolueno.....	7372
Ilustración 30. Campana de saturación y ciclo HP del novec-649.	7473
Ilustración 31. Campana de saturación y ORC del novec-649.....	7675
Ilustración 32. Campana de saturación y ORC del etanol.....	7675

Ilustración 33. Ciclo de Bomba de Calor final	7877
Ilustración 34. Ciclo Orgánico de Rankine final.....	7978

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día existe una tendencia mundial de descarbonización del sistema energético hacia modelos energéticos más sostenibles medioambientalmente. Esto es destacable especialmente en los países europeos dónde esto no solo es de alto interés por la sostenibilidad del sistema, sino que además representa un factor estratégico para alcanzar una independencia energética respecto a otros países del mundo.

Claro reflejo de este interés en Europa son políticas europeas como la Ley climática europea o el Pacto Verde Europeo donde se fija un objetivo europeo de alcanzar una economía climáticamente neutral para 2050, fijándose además metas intermedias para 2030 de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero de al menos el 55%. En este contexto, uno de los desafíos claves para alcanzar estos objetivos es la descarbonización del sector de producción de frío y calor, que actualmente representa en torno a la mitad del consumo final de energía en Europa y el cual se basa fundamentalmente en el uso de combustibles fósiles.

De las diferentes soluciones asociadas al sector de la producción de frío y calor, las redes de **d**Distrito de frío o calor (District Heating and Cooling) son infraestructuras clave que permiten la descarbonización a través del uso de instalaciones de producción de energía alternativas, basadas en la combinación de diferentes tecnologías renovables y/o la recuperación del calor residual proveniente de industrias. Sin embargo, estas tecnologías presentan una gran desventaja asociado a la seguridad de suministro debido a la dependencia de un recurso intermitente que durante gran parte del día no está disponible a la vez que existe una demanda de energía en los hogares.

Por esto, el uso de sistemas de almacenamiento competitivos representa un papel clave para la descarbonización de este sector ya que permiten acoplar la producción basada en fuentes renovables y/o en el aprovechamiento de calor residual industrial a la demanda de los hogares pertenecientes a la red de distrito. En concreto, las soluciones basadas en el concepto Power to Heat to Power se presentan con un enorme potencial ya que permiten la transformación de la electricidad excedente de fuentes renovables en calor para su almacenamiento de forma competitiva y su posterior entrega o bien en forma de calor, o en forma de electricidad a través de un ciclo de potencia.

El modelado, simulación y análisis de estos sistemas es clave para una mayor comprensión de estos y para cuantificar su verdadero potencial.

2. OBJETIVO

El objetivo del proyecto es desarrollar una solución Power to Heat to Power para su aplicación en redes de distrito de frío y calor, con el fin de reducir la dependencia de combustibles fósiles y alcanzar los objetivos europeos de descarbonización del sistema energético. Se busca diseñar una solución de almacenamiento termoquímico competitiva que permita acoplar la producción basada en fuentes renovables y/o en el aprovechamiento de calor residual industrial a la demanda de los hogares pertenecientes a la red de distrito. Además, se espera cuantificar el verdadero potencial de esta solución a través del modelado, simulación y análisis de los ciclos de carga y descarga del almacenamiento termoquímico y los ciclos orgánicos. En definitiva, el proyecto busca contribuir al desarrollo de modelos energéticos más sostenibles y a la lucha contra el cambio climático. [Este TFG se centrará en la parte de modelado y simulación de los ciclos, con el fin de elegir un fluido de trabajo eficiente y la configuración de los ciclos óptimas.](#)

Comentado [MS1]: Este es el objetivo del proyecto, pero puedes ser un poco más específica en cuanto al objetivo de tu TFG. Por ejemplo, si no estoy equivocado tú has trabajado básicamente en el modelado y el análisis de distintas configuraciones...

3. FUNDAMENTOS

3.1 Transición energética

3.1.1 Problemática del cambio climático

El cambio climático es un fenómeno global que se ha vuelto más evidente en las últimas décadas debido a la actividad humana. Según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, el cambio climático se refiere a "un cambio significativo y duradero en los patrones climáticos promedio en todo el mundo o en una región específica durante un período prolongado" (EPA, 2021). Este cambio se debe en gran medida a la emisión de gases de efecto invernadero por parte de la actividad humana, especialmente la quema de combustibles fósiles.

Ha sido objeto de estudio por parte de científicos, políticos y la sociedad en general. Según el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), el cambio climático se define como "un cambio en el estado del clima que puede ser identificado (por ejemplo, mediante el uso de estadísticas) por cambios en el promedio y/o la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un período prolongado, típicamente décadas o más" (IPCC, 2014).

En la actualidad, ya se aprecian las graves consecuencias de este fenómeno. La Organización Mundial de la Salud (OMS) informa que "el cambio climático ya está causando impactos significativos en la salud humana, incluyendo un mayor riesgo de enfermedades y muertes relacionadas con el calor extremo y la mala calidad del aire" (OMS, 2021). Además, la pérdida de hielo en los polos y el aumento del nivel del mar ya están afectando a las zonas costeras y a las comunidades que viven allí. Si no se toman medidas para abordar el cambio climático, las consecuencias serán aún más graves en el futuro cercano. Según un informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, "las olas de calor, las sequías, las inundaciones y los ciclones tropicales se volverán más frecuentes y severos en muchos lugares del mundo" (IPCC, 2021). Esto tendrá un impacto significativo en la producción de alimentos y en la seguridad alimentaria en todo el mundo.

En Europa, el cambio climático ha tenido efectos significativos en diversos aspectos, incluyendo la temperatura, la precipitación, la biodiversidad y la salud pública. Según el informe del European Environment Agency (EEA) sobre el estado y perspectivas del medio ambiente en Europa, "la temperatura media en Europa ha aumentado en 1,8°C desde la era preindustrial, y se espera que aumente aún más, lo que tendrá un impacto significativo en los ecosistemas y la vida humana" (EEA, 2016). Además, el cambio climático también afecta a la biodiversidad de Europa, ya que

se prevé que muchas especies de plantas y animales sufran una disminución en su población y distribución geográfica debido a los cambios en el clima (IPCC, 2014). Según el informe del EEA, "en Europa, se han observado cambios significativos en la distribución geográfica de muchas especies, incluidas las aves y las mariposas, que se han trasladado hacia el norte y hacia altitudes más altas debido al aumento de las temperaturas" (EEA, 2022).

Por otro lado, el cambio climático también tiene un impacto en la salud pública. Según la Organización Mundial de la Salud, "el cambio climático ya está teniendo un impacto en la salud humana, y se espera que aumente el número y la intensidad de enfermedades como la malaria y el dengue, así como las enfermedades respiratorias y cardiovasculares asociadas con la contaminación del aire" (OMS, 2021).

En conclusión, el cambio climático es un fenómeno que está teniendo un impacto significativo en Europa en varios aspectos, incluyendo la temperatura, la biodiversidad y la salud pública. Es necesario tomar medidas para mitigar los efectos del cambio climático y adaptarse a los cambios que ya están ocurriendo.

3.1.2 Objetivos de la Unión Europea

La Unión Europea ha adoptado una serie de medidas energéticas con el objetivo de fomentar el uso de fuentes de energía más sostenibles y reducir su dependencia de los combustibles fósiles. Estas medidas se basan en una serie de leyes y reglamentos que establecen objetivos concretos a alcanzar.

Una de las principales leyes que rigen la política energética de la Unión Europea es la Ley Europea del Clima. Dicha ley es una iniciativa legislativa que busca establecer el marco legal para alcanzar la neutralidad climática de la UE para 2050, y cuyo alcance se intensifica a partir de 2022. Según la Comisión Europea, la Ley tiene como objetivo establecer una "trayectoria clara y coherente" para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero de la UE y establece un objetivo de reducción de al menos el 55% de las emisiones de gases de efecto invernadero para 2030 en comparación con los niveles de 1990.

La Ley también establece la creación de un Consejo Europeo del Clima y la elaboración de planes nacionales para la energía y el clima, que deben ser actualizados cada 10 años. Además, se establece un marco de gobernanza para asegurar que los Estados miembros cumplan con sus objetivos nacionales de reducción de emisiones.

Es importante mencionar el Pacto Verde Europeo. El Pacto Verde Europeo es una iniciativa impulsada por la Unión Europea para lograr la neutralidad climática para el año 2050 y, así, hacer de Europa el primer continente climáticamente neutro del mundo. El Pacto Verde Europeo se basa

en una estrategia integrada que abarca diferentes ámbitos, como la energía, la industria, la movilidad, la agricultura, la economía circular, entre otros, con el objetivo de transformar la economía y la sociedad europea hacia un modelo más sostenible y justo.

En cuanto a la parte energética del Pacto Verde Europeo, se establecen una serie de objetivos y medidas para lograr la transición energética necesaria para alcanzar la neutralidad climática. Entre ellos, destacan los siguientes:

- Para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en al menos un 55% para 2030 se propone la revisión del Reglamento de Comercio de Emisiones de la UE (ETS, por sus siglas en inglés) para incluir un límite inferior de emisiones más ambicioso y un nuevo mecanismo de ajuste en caso de desviaciones significativas.
- Una revisión de la Directiva de Energías Renovables de la UE (RED II) para aumentar el objetivo de energías renovables, fomentar la energía eólica marina y simplificar el acceso a la red eléctrica, con el objetivo de al menos el 32% de la energía consumida en la UE proviene de fuentes renovables para 2030.
- Con el fin de aumentar la eficiencia energética en al menos un 32,5% para 2030 se procede a la revisión de la Directiva de Eficiencia Energética de la UE (EED) para mejorar los objetivos de eficiencia energética, establecer una metodología común para medir el rendimiento energético y fomentar la renovación de edificios.
- Creación de una Ley de Mercado Europeo de Energía para mejorar la cooperación transfronteriza en el sector energético, fomentar la innovación tecnológica y mejorar la seguridad energética y crear así un mercado europeo de energía más integrado.
- También se trata una nueva estrategia de descarbonización a largo plazo. La descarbonización se refiere a la reducción o eliminación de la dependencia de combustibles fósiles que emiten dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera. La descarbonización es esencial para abordar el cambio climático y lograr la neutralidad climática, que es la condición en la que las emisiones de gases de efecto invernadero se equilibran con su eliminación de la atmósfera. Esta estrategia establece el objetivo de lograr la neutralidad climática de la UE para 2050, con el fin de limitar el aumento de la temperatura global a 1,5°C.

• **3.1.3 Necesidad de la descarbonización de la producción de frío y calor**

La producción de frío y calor en Europa tiene un impacto significativo en el medio ambiente y en la calidad de vida de las personas. La creciente demanda de energía para enfriar y calentar los hogares, edificios y vehículos ha llevado a una mayor producción de emisiones de gases de efecto

invernadero y otros contaminantes atmosféricos. Esta situación ha llevado a la necesidad de buscar alternativas más sostenibles y eficientes en la producción de frío y calor.

El impacto ambiental de la producción de frío y calor en Europa ha sido objeto de numerosos estudios y análisis. Un estudio realizado por la Agencia Europea del Medio Ambiente (EEA) concluye que "los sistemas de refrigeración y aire acondicionado tienen un impacto significativo en el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero en Europa" (EEA, 2016). El informe también señala que los refrigerantes utilizados en estos sistemas pueden ser altamente contaminantes y que su eliminación inadecuada puede tener un impacto negativo en el medio ambiente.

El suministro de frío y calor en Europa se realiza principalmente mediante el uso de combustibles fósiles como el gas natural, el petróleo y el carbón. Estos combustibles emiten gases de efecto invernadero y otros contaminantes atmosféricos como el dióxido de azufre, el óxido de nitrógeno y las partículas. Estas emisiones contribuyen al calentamiento global y al cambio climático, así como a la contaminación del aire [y al deterioro de la calidad](#) del agua.

El sector de la producción de frío y calor es responsable de una gran parte de las emisiones de gases de efecto invernadero en Europa. Según la Agencia Europea de Medio Ambiente, el sector de la energía y la industria representa el 80% de las emisiones de gases de efecto invernadero en Europa. Además, el uso de sistemas de refrigeración y aire acondicionado también es responsable de una parte significativa de la demanda de electricidad en Europa.

La descarbonización de los suministros de calor y frío en Europa es una necesidad urgente para combatir el cambio climático y cumplir con los objetivos de reducción de emisiones establecidos en el Acuerdo de París. La utilización de combustibles fósiles para la producción de energía térmica es una de las principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero en la Unión Europea, y representa una parte significativa de su huella de carbono total.

Además, la dependencia de los combustibles fósiles también aumenta la vulnerabilidad de la UE a los precios y suministros volátiles de los mercados globales de energía. La descarbonización de la producción de calor y frío puede reducir esto y mejorar la seguridad energética de la UE.

La transición a fuentes de energía renovable y tecnologías de baja emisión de carbono en este sector es clave para la descarbonización de estos. Esto puede incluir la utilización de biomasa, geotermia, energía solar térmica, entre otras tecnologías.

3.1.4 Redes de distrito de frío y calor (DHC)

Las redes de distrito de frío y calor son sistemas centralizados que distribuyen energía térmica,

en forma de calor o frío, a múltiples edificios a través de una red de tuberías. Estos sistemas se utilizan para proporcionar calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria a los edificios conectados a la red.

Entre las ventajas medioambientales de las redes de distrito de frío y calor se incluyen:

- Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero: Estas redes utilizan fuentes de energía renovable, como la geotermia, la energía solar y la biomasa, para generar calor y frío. Al hacerlo, reducen significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con las fuentes de energía fósiles.
- Mayor eficiencia energética: Las redes de distrito de frío y calor tienen una mayor eficiencia energética en comparación con los sistemas de climatización convencionales, ya que utilizan tecnologías avanzadas de recuperación de calor y frío para aprovechar al máximo los recursos energéticos disponibles.
- Reducción de la dependencia de los combustibles fósiles: Al utilizar fuentes de energía renovable y tecnologías avanzadas de recuperación de calor y frío, las redes de distrito de frío y calor reducen la dependencia de los combustibles fósiles y, por lo tanto, aumentan la seguridad energética.
- Reducción del impacto ambiental: Las redes de distrito de frío y calor tienen un impacto ambiental mucho menor que los sistemas de climatización convencionales, ya que reducen la necesidad de utilizar refrigerantes y otros productos químicos que pueden ser perjudiciales para el medio ambiente.

3.2 Necesidad de almacenamiento

Las energías renovables son aquellas que se obtienen de fuentes naturales que no se agotan, como la energía solar, eólica, hidráulica, geotérmica y biomasa. Estas fuentes de energía tienen ventajas e inconvenientes que son importantes tener en cuenta para una evaluación integral de su impacto. A continuación, se presentan algunas de las ventajas e inconvenientes de las energías renovables.

Por un lado, las ventajas son:

- Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero: Las energías renovables emiten menos gases de efecto invernadero que los combustibles fósiles. Según el informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático de 2021, "el uso de energía renovable ha aumentado rápidamente en la última década, contribuyendo significativamente a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en algunos países".

- Abundancia de recursos naturales: Las fuentes de energía renovable son abundantes en la naturaleza y se pueden obtener de forma sostenible. Por ejemplo, la energía solar es una fuente de energía renovable abundante y accesible en todo el mundo.
- Generación de empleo: Las energías renovables pueden generar empleo en la industria y la fabricación de equipos y sistemas de energía renovable. Según la Organización Internacional del Trabajo las políticas del Acuerdo de París en relación con la transición energética podrían generar hasta 24 millones de empleos en todo el mundo para 2030.

También presentan algunos inconvenientes:

- Dependencia de las condiciones climáticas: Las energías renovables dependen de las condiciones climáticas para su generación, lo que puede hacer que su producción sea intermitente e impredecible. Según el informe del IPCC de 2021, "la variabilidad natural de las fuentes de energía renovable y los eventos climáticos extremos pueden afectar la estabilidad de la generación de energía renovable" (IPCC, 2021).
- Altos costos iniciales: La instalación de equipos y sistemas de energía renovable puede ser costosa, lo que puede dificultar su adopción a gran escala.
- Impacto ambiental: Aunque las energías renovables tienen menos impacto ambiental que los combustibles fósiles, aún pueden tener un impacto en la flora y fauna local, así como en los paisajes naturales. Según el informe del Programa de Medioambiente de las Naciones Unidas de 2019, "la construcción de infraestructuras para energía renovable puede tener impactos negativos en los ecosistemas naturales y los paisajes culturales" (PMNU, 2019).

Uno de los inconvenientes más significativos de las energías renovables es su dependencia de las condiciones climáticas para su generación, lo que puede hacer que su producción sea intermitente e impredecible. Este inconveniente se relaciona con la variabilidad natural de las fuentes de energía renovable y los eventos climáticos extremos, que pueden afectar la estabilidad de la generación de energía renovable (IPCC, 2021). Por ejemplo, la energía solar depende de la cantidad de luz solar disponible, lo que puede variar según el clima y la hora del día. De manera similar, la energía eólica depende de la velocidad del viento, que puede ser intermitente y variable en diferentes ubicaciones geográficas y momentos del día.

Este inconveniente ha llevado a algunas críticas hacia las energías renovables, argumentando que su intermitencia y falta de previsibilidad las hacen inapropiadas como fuente principal de energía. Sin embargo, se están desarrollando soluciones para abordar este problema, como el almacenamiento de energía.

La creciente necesidad de energía renovable y el aumento en la demanda de energía en todo el mundo han llevado a una mayor necesidad de sistemas de almacenamiento energético. Los sistemas de almacenamiento energético permiten la integración efectiva de fuentes de energía renovable, como

Comentado [MS2]: Incluir referencia. En algunos otros puntos, por ejemplo dos párrafos más abajo, también faltan.

la energía solar y la eólica, en la red eléctrica, al tiempo que garantizan una fuente constante de energía.

~~Sin embargo, la disponibilidad de la energía renovable no siempre coincide con la demanda de energía, lo que significa que la energía generada puede no ser utilizada de manera eficiente. Los sistemas de almacenamiento energético permiten el almacenamiento de la energía generada durante periodos de baja demanda y su uso posterior durante periodos de alta demanda.~~

En la actualidad, existen varios tipos de sistemas de almacenamiento energético, incluyendo el almacenamiento de energía en baterías, almacenamiento hidráulico, almacenamiento térmico, entre otros. Cada uno de estos sistemas tiene sus propias ventajas e inconvenientes, y su elección dependerá de las necesidades específicas del sistema en cuestión.

La necesidad de sistemas de almacenamiento energético es evidente dada la creciente demanda de energía y la necesidad de integrar fuentes de energía renovable en la red eléctrica. Los sistemas de almacenamiento energético pueden mejorar la calidad de la energía, la estabilidad de la red eléctrica y la eficiencia energética en general. Por lo tanto, es esencial continuar investigando y desarrollando sistemas de almacenamiento energético efectivos y eficientes.

3.3 ~~Sistemas~~ Sistema Power to Heat to Power

3.3.1 Almacenamiento térmico

El almacenamiento térmico es una tecnología que se utiliza para retener y liberar energía térmica en un sistema. Esto se logra mediante la acumulación de calor durante periodos de baja demanda y su liberación posterior durante periodos de alta demanda. Existen varios tipos de almacenamiento térmico, cada uno con sus propias características y aplicaciones.

El almacenamiento térmico sensible es el tipo más común de almacenamiento térmico. En este método, se utiliza un material con una alta capacidad calorífica, como el agua o el aire, para almacenar calor. Durante los periodos de baja demanda de energía, el material se calienta y se almacena en un tanque de almacenamiento. Cuando se necesita energía térmica, el material se dirige a través de un intercambiador de calor para proporcionar calor a un edificio o proceso. La ventaja de este método es que es relativamente simple y económico. Sin embargo, el almacenamiento térmico sensible puede ser menos eficiente que otros métodos debido a las pérdidas de calor durante el almacenamiento y el transporte.

El almacenamiento térmico latente es otro tipo de almacenamiento térmico que utiliza materiales de cambio de fase, como las sales eutécticas o los materiales de cambio de fase orgánicos. Durante los periodos de baja demanda de energía, el material se calienta y se derrite, absorbiendo energía térmica en forma latente. Cuando se necesita energía térmica, el material se solidifica y libera la energía

Comentado [MS3]: Creo que este párrafo es un poco reiterativo...

Con formato: Inglés (Estados Unidos)

Con formato: Inglés (Estados Unidos)

almacenada en forma latente. La ventaja de este método es que el material puede almacenar grandes cantidades de energía térmica en un espacio reducido, lo que lo hace adecuado para aplicaciones de alta densidad energética. Sin embargo, el almacenamiento térmico latente puede ser más costoso que el almacenamiento sensible debido a la necesidad de materiales especiales y a la complejidad de los sistemas de control.

El almacenamiento térmico termoquímico es un tipo de almacenamiento térmico que utiliza reacciones químicas para almacenar y liberar energía térmica. Durante los períodos de baja demanda de energía, se utiliza energía térmica para descomponer un material en sus componentes básicos, siendo una reacción endotérmica. Cuando se necesita energía térmica, se invierte la reacción química, provocando una reacción exotérmica, y se libera la energía almacenada. La ventaja de este método es que puede almacenar grandes cantidades de energía térmica con una alta eficiencia energética y durante periodos de tiempo más largos sin tantas pérdidas energéticas. Sin embargo, el almacenamiento térmico termoquímico puede ser más costoso que otros métodos debido a la complejidad de los sistemas de reacción y a la necesidad de materiales especiales. Este es el tipo de almacenamiento es el usado en el proyecto RESTORE y, por lo tanto, en este trabajo de fin de grado.

El almacenamiento termoquímico es una tecnología que permite almacenar energía térmica en forma de productos químicos, los cuales pueden liberar calor cuando se realiza una reacción química. Esta tecnología se utiliza para el almacenamiento de energía renovable y puede ser aplicada en diferentes sectores como la industria, el transporte y la vivienda.

El proceso de almacenamiento termoquímico consta de dos fases: carga y descarga. Durante la fase de carga, se realiza una reacción endotérmica que consume energía para almacenarla en forma de un producto químico. Por ejemplo, en el almacenamiento de energía mediante hidrógeno, se utiliza energía eléctrica para descomponer el agua en hidrógeno y oxígeno.

Durante la fase de descarga, se realiza una reacción exotérmica que libera la energía almacenada. Por ejemplo, en el almacenamiento de energía mediante hidrógeno, el hidrógeno se combina con oxígeno para generar calor y vapor de agua.

3.3.1 Ciclo de Potencia

En un sistema [power to heat to power \(P2H2P\)](#) es necesaria la carga y la descarga el almacenamiento usado. Estas se hacen con un ciclo que transforme la potencia [eléctrica](#) en calor, como puede ser la bomba de calor, y un ciclo que convierta el calor almacenado en potencia [eléctrica](#), como puede ser un ciclo de Rankine.

La bomba de calor es un sistema termodinámico capaz de transferir calor de un medio a otro, aprovechando la energía disponible en el ambiente y transformándola en energía útil. El

Comentado [MS4]: Creo que es la primera vez que parece este acrónimo, por tanto hay que hacer explícito su significado

Comentado [MS5]: Aunque en inglés power se refiere casi siempre a potencia eléctrica, en español no es así.

funcionamiento de este sistema se basa en un ciclo termodinámico que permite el intercambio de calor entre una fuente caliente y una fuente fría.

El ciclo de la bomba de calor se divide en cuatro fases: evaporación, compresión, condensación y expansión. En la fase de evaporación, el refrigerante líquido absorbe calor del medio ambiente y se transforma en vapor. Luego, en la fase de compresión, el vapor se comprime, aumentando su temperatura y presión. En la fase de condensación, el refrigerante cede calor al medio que se desea calentar y se condensa, transformándose nuevamente en líquido. Por último, en la fase de expansión, el refrigerante se expande y se enfría, preparándose para volver a la fase de evaporación.

La bomba de calor es utilizada para calentar ambientes en el invierno y refrigerarlos en el verano, siendo una alternativa más eficiente y económica que los sistemas de calefacción y aire acondicionado convencionales. Además, la bomba de calor también puede ser utilizada para calentar agua sanitaria y piscinas, entre otras aplicaciones.

Las partes principales de una bomba de calor son el compresor, el evaporador, el condensador y el dispositivo de expansión. El compresor es el encargado de comprimir el refrigerante y aumentar su temperatura y presión. El evaporador es el lugar donde el refrigerante absorbe calor del ambiente que se desea calentar. El condensador es el lugar donde el refrigerante cede calor al ambiente que se desea enfriar. Por último, el dispositivo de expansión reduce la presión del refrigerante y prepara el sistema para la fase de evaporación.

Los parámetros característicos de una bomba de calor son la potencia térmica, el coeficiente de rendimiento (COP, por sus siglas en inglés) y la temperatura de salida de la fuente caliente. La potencia térmica indica la cantidad de calor que la bomba de calor es capaz de transferir en un determinado tiempo. El coeficiente de rendimiento es la relación entre la potencia térmica entregada y la potencia eléctrica consumida por la bomba de calor. Cuanto mayor sea el coeficiente de rendimiento, más eficiente será la bomba de calor. La temperatura de salida de la fuente caliente indica la temperatura a la que la bomba de calor es capaz de calentar el ambiente. La relación entre el rendimiento de la bomba de calor y sus parámetros es fundamental para garantizar su eficiencia energética y reducir el consumo eléctrico. Un coeficiente de rendimiento elevado permite que la bomba de calor transfiera más calor con menos consumo eléctrico, lo que se traduce en un ahorro significativo de energía eléctrica.

El ciclo orgánico de Rankine es un ciclo termodinámico utilizado en la generación de energía eléctrica a partir del calor de la combustión de combustibles fósiles, biomasa u otros tipos de fuente de calor. Este ciclo se basa en la utilización de un fluido orgánico en lugar del agua utilizada en el ciclo de Rankine convencional.

El ciclo orgánico de Rankine se divide en cuatro fases: evaporación, compresión, condensación y expansión. En la fase de evaporación, el fluido orgánico absorbe calor y se transforma en vapor. Luego, en la fase de expansión, el fluido orgánico se expande y se enfría, preparándose para volver a la fase de condensación. En la fase de condensación, el vapor cede calor al medio de refrigeración y se condensa, transformándose nuevamente en líquido. Por último, en la fase de compresión, el vapor se comprime, aumentando su temperatura y presión.

El ciclo orgánico de Rankine es utilizado para generar energía eléctrica a partir del calor producido por la combustión de diferentes tipos de combustibles. Este proceso se realiza en una central térmica, donde se quema el combustible para generar vapor de agua o de fluido orgánico, que a su vez mueve las turbinas que generan electricidad.

Las partes principales del ciclo orgánico de Rankine son el evaporador, el compresor, el condensador y la turbina. El evaporador es el lugar donde el fluido orgánico absorbe calor y se transforma en vapor. El compresor es el encargado de comprimir el vapor, aumentando su temperatura y presión. El condensador es el lugar donde el vapor cede calor al medio de refrigeración y se condensa. Por último, la turbina es la encargada de transformar la energía térmica del vapor en energía mecánica, que a su vez se convierte en energía eléctrica.

Los parámetros característicos del ciclo orgánico de Rankine son la eficiencia térmica, la temperatura de salida del vapor, la presión del vapor y el tipo de fluido orgánico utilizado. La eficiencia térmica indica la capacidad del ciclo de transformar la energía térmica del combustible en energía eléctrica. La temperatura de salida del vapor indica la temperatura a la que el vapor sale de la turbina, lo que tiene un impacto directo en la eficiencia del ciclo. La presión del vapor es un parámetro importante ya que, a mayor presión, mayor será la eficiencia del ciclo. Por último, el tipo de fluido orgánico utilizado es importante ya que diferentes fluidos orgánicos tienen diferentes temperaturas de evaporación y condensación, lo que afecta la eficiencia del ciclo.

La relación entre la eficiencia del ciclo orgánico de Rankine y sus parámetros es fundamental para garantizar su eficiencia energética y reducir la emisión de gases de efecto invernadero. Un ~~mayor~~ ~~coeficiente de eficiencia na~~ ~~mayor eficiencia~~ térmica permite que el ciclo convierta una mayor cantidad de energía térmica en energía eléctrica, lo que se traduce en una mayor eficiencia energética y una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

3.4 Solución propuesta.

El Power to Heat to Power (P2H2P) es un proceso que permite la conversión de energía eléctrica en calor y posteriormente en energía eléctrica nuevamente. En esta variante, se utiliza una bomba

Comentado [MS6]: ¿No sería simplemente una mayor eficiencia térmica?

de calor, un almacenamiento termoquímico y un ciclo de potencia Rankine para llevar a cabo el proceso. El objetivo es integrar la generación de energía renovable intermitente con sistemas de calefacción y refrigeración, permitiendo el almacenamiento y la utilización eficiente de la energía.

El P2H2P con bomba de calor, almacenamiento termoquímico y ciclo de potencia Rankine consta de tres fases principales: la fase de conversión de energía eléctrica a calor mediante la bomba de calor, la fase de almacenamiento de calor en un material termoquímico, la fase de conversión de calor en energía eléctrica mediante el ciclo Rankine.

En la primera fase, la energía eléctrica se convierte en calor mediante una bomba de calor, que utiliza un refrigerante para transferir calor del medio ambiente al sistema de almacenamiento termoquímico. En la segunda fase, el calor generado se almacena en el material termoquímico, que se descompone y libera calor cuando se le aplica una fuente de energía externa. En la tercera fase, el calor almacenado se convierte nuevamente en energía eléctrica a través de un ciclo de potencia Rankine, que utiliza el calor para generar vapor y hacer funcionar una turbina.

Este proceso se utiliza para integrar la generación de energía renovable intermitente con sistemas de calefacción y refrigeración, permitiendo el almacenamiento y la utilización eficiente de la energía. Además, el P2H2P con bomba de calor, almacenamiento termoquímico y ciclo de potencia Rankine también se puede utilizar para proporcionar servicios de regulación de frecuencia y reserva de capacidad, lo que permite una mayor penetración de energías renovables en el sistema eléctrico.

Los parámetros característicos del P2H2P con bomba de calor, almacenamiento termoquímico y ciclo de potencia Rankine son la eficiencia energética, la capacidad de almacenamiento de calor, la temperatura de descomposición del material termoquímico y el tiempo de respuesta entre otros. La eficiencia energética indica la capacidad del proceso para transformar la energía eléctrica en energía térmica y luego en energía eléctrica nuevamente. Este parámetro está influenciado por factores como el rendimiento de la bomba de calor, la eficiencia del ciclo Rankine y las pérdidas térmicas del almacenamiento termoquímico. Una mayor eficiencia energética resulta en una mayor cantidad de energía eléctrica producida a partir de una cantidad determinada de energía eléctrica inicial, lo que se traduce en un mayor ahorro de energía y costos.

La capacidad de almacenamiento de calor se refiere a la cantidad de energía térmica que puede ser almacenada en el material termoquímico utilizado en el proceso. Cuanto mayor sea la capacidad de almacenamiento de calor, mayor será la cantidad de energía térmica que puede ser almacenada en el material y, por lo tanto, mayor será la cantidad de energía eléctrica producida durante la fase de generación de energía del proceso.

La temperatura de ~~desecomposición~~ condensación del material termoquímico es otro parámetro importante en el proceso P2H2P. Este valor indica la temperatura a la cual el material termoquímico comienza a liberar energía térmica almacenada en forma de vapor de agua. Una mayor temperatura de ~~desecomposición~~ condensación significa que el proceso puede ser más eficiente y producir más energía eléctrica a partir de la misma cantidad de material termoquímico.

Finalmente, el tiempo de respuesta del proceso P2H2P también es un parámetro importante a considerar. Este valor se refiere al tiempo que tarda el sistema en producir energía eléctrica después de recibir una señal de inicio. Un tiempo de respuesta más corto significa que el proceso puede responder más rápidamente a la demanda de energía, lo que lo hace más adaptable y eficiente en situaciones de alta demanda.

El proyecto europeo RESTORE es un proyecto coordinado por el Centro Nacional de Energías Renovables en España y en el cual trabajan ~~organizaciones de grupos de~~ 6 países más. Se basa en una solución P2H2P para las redes de frío y calor centralizadas. La solución se basa en un P2H2P, para las redes de frío y calor centralizadas, combinando dos tecnologías clave: un sistema de almacenamiento de energía térmica basado en reacciones termoquímicas, llamado TCES, y un sistema de bomba de calor y ciclo orgánico de Rankine combinado con TCES.

El TCES permite almacenar energía a diario y a largo plazo, lo que permite aprovechar la enorme cantidad de energía que se desperdicia debido a la falta de coincidencia entre la demanda y la generación de energía renovable, ~~especialmente entre las estaciones~~. En época estival, cuando los recursos renovables térmicos tienen grandes excedentes, el TCES permite almacenar esta energía, para descargarla en invierno, cuando los recursos son más limitados y se necesita un mayor consumo en calefacción. Además, el sistema es de bajo costo y tiene una alta densidad de energía y pérdidas de energía muy bajas.

El segundo sistema, basado en bombas de calor y ciclo orgánico de Rankine, adapta la energía proporcionada por diversas tecnologías renovables para alimentar el sistema de almacenamiento, lo que permite integrar una amplia variedad de fuentes de energía renovable y de calor residual en todo el sistema.

Esta solución innovadora aborda los principales obstáculos para la amplia implementación de tecnologías de energía renovable y de calor residual en las redes DHC existentes y futuras, mejorando la sostenibilidad ambiental y económica. El proyecto busca validar el concepto RESTORE mediante experimentos y demostrar su capacidad de replicación, adaptando y optimizando la solución propuesta para diferentes ubicaciones en toda la UE y cuantificando sus posibles beneficios a través de casos de uso virtuales.

Comentado [MS7]: ¿Sería realmente una temperatura de descomposición? ME quedan algunas dudas con respecto a estas explicaciones.

Comentado [MS8]: Esto habría que explicarlo un poco

Este proyecto de fin de grado se basa en [el modelado y simulación de](#) la solución expuesta en RESTORE.

Comentado [MS9]: A esto me refería en el apartado Objetivos. El TFG se basa en la solución RESTORE, pero, ¿qué abarca exactamente?

4. METODOLOGÍA Y HERRAMIENTAS

Para modelar y simular la solución propuesta se han utilizado fundamentalmente dos programas, el IPSE pro y el Refprop.

4.1 IPSE pro

IPSEpro es un software de simulación de procesos termoenergéticos desarrollado por la empresa austriaca SimTech Simulation Technology. Este software se utiliza para modelar y analizar sistemas de energía y procesos de producción en diferentes industrias, incluyendo la industria química, petroquímica, energética, entre otras

IPSEpro utiliza un enfoque modular para modelar sistemas termoenergéticos, lo que permite a los usuarios crear modelos personalizados para sistemas complejos. El software proporciona una amplia gama de herramientas de modelado para representar componentes y sistemas, incluyendo turbinas, compresores, intercambiadores de calor, calderas, enfriadores, reactores, y muchos más.

IPSEpro también ofrece una amplia variedad de modelos termodinámicos y propiedades de sustancias, lo que permite a los usuarios modelar y analizar sistemas que involucran sustancias puras y mezclas. Además, el software incluye una biblioteca de modelos de procesos comunes y soluciones de problemas que pueden ser utilizados como punto de partida para nuevos modelos.

El software IPSEpro también ofrece una interfaz gráfica de usuario intuitiva que facilita la creación y edición de modelos. Además, el software permite la simulación en tiempo real, lo que permite a los usuarios ver los resultados de la simulación en tiempo real y hacer cambios sobre la marcha.

IPSEpro es utilizado en una amplia variedad de aplicaciones en la industria y la investigación, incluyendo el diseño y optimización de procesos de producción, el análisis de la eficiencia energética de sistemas, el diseño y optimización de sistemas de energía renovable, el diseño y optimización de sistemas de cogeneración, etc.

Este programa ha sido el utilizado para modelar y simular el ciclo de bomba de calor y el ciclo orgánico de Rankine en condiciones de diseño y cargas parciales, ya que la empresa SimTech participa en el proyecto RESTORE. Dentro de las distintas librerías del software, se encuentra la librería RESTORE, creada para facilitar el modelado usando como fluidos, fluidos orgánicos.

Dentro de IPSEpro nos encontramos con el Model Development Kit (MDK) y con el Process Simulation Environment (PSE).

El MDK es una herramienta de desarrollo de modelos. Permite a los usuarios crear y personalizar equipos, componentes y sistemas termoenergéticos utilizando el lenguaje de programación C++.

Comentado [MS10]: Referencias

Comentado [MS11R10]: Siguen faltando estas referencias

Con el MDK, los usuarios pueden desarrollar modelos de componentes personalizados que no están disponibles en la librería de modelos integrada de IPSEpro, como, por ejemplo, modelos de reactores específicos, modelos de equipos de procesamiento personalizados y modelos de sistemas de almacenamiento de energía.

Esta herramienta proporciona una variedad de herramientas y bibliotecas que permiten a los usuarios desarrollar modelos de manera más eficiente y efectiva. Estas herramientas incluyen una biblioteca de funciones matemáticas, herramientas para la manipulación de matrices y vectores, y herramientas para la interpolación y extrapolación de datos.

El MDK es especialmente útil para aquellos usuarios que necesitan desarrollar modelos de componentes personalizados para satisfacer las necesidades específicas de su proceso o sistema termoenergético. Al permitir la creación de modelos personalizados, el MDK amplía la capacidad del software IPSEpro para modelar sistemas complejos y para realizar análisis avanzados.

La herramienta denominada Process Simulation Environment (PSE) o Entorno de Simulación de Procesos en español proporciona a los usuarios la capacidad de modelar y simular sistemas termodinámicos y de ingeniería complejos en una amplia variedad de sectores, como la energía, la química y la industria. Al utilizar la simulación de procesos, los usuarios pueden obtener información valiosa sobre el diseño y la operación de sistemas y procesos, lo que puede conducir a mejoras en la eficiencia energética y la rentabilidad de las operaciones.

El PSE es muy configurable y personalizable gracias al MDK, lo que permite a los usuarios adaptar la simulación a sus necesidades específicas. Los usuarios pueden crear modelos de procesos detallados y precisos, que incluyen sistemas térmicos, mecánicos y de control, así como sistemas de fluidos. Además, el entorno de simulación es compatible con una amplia gama de bibliotecas de modelos, lo que permite a los usuarios utilizar modelos preexistentes para simplificar el proceso de modelado y simulación.

Esta aplicación también cuenta con una amplia gama de herramientas de análisis y visualización, que permiten a los usuarios analizar y entender los resultados de la simulación de manera efectiva. Entre las herramientas de análisis se incluyen herramientas para el análisis estadístico, la optimización y la validación de modelos. Las herramientas de visualización permiten a los usuarios generar gráficos y representaciones visuales de los datos de simulación para facilitar la comprensión de los resultados.

4.2 Refprop

Refprop es un software termodinámico desarrollado por el National Institute of Standards and Technology (NIST) de los Estados Unidos, que proporciona propiedades termodinámicas de sustancias puras y mezclas, y permite realizar cálculos de procesos termodinámicos.

Este software se basa en la ecuación de estado REFPROP, que utiliza modelos matemáticos avanzados para predecir las propiedades termodinámicas de las sustancias en función de la temperatura, presión y composición. La ecuación de estado REFPROP es altamente precisa y se ha validado mediante comparaciones con datos experimentales en una amplia gama de condiciones.

Refprop es capaz de proporcionar una gran variedad de propiedades termodinámicas, como la entalpía, entropía, energía interna, capacidad calorífica, velocidad del sonido, viscosidad, conductividad térmica, coeficiente de expansión térmica, y muchas otras propiedades importantes. Además, Refprop puede manejar una amplia gama de sustancias, incluyendo hidrocarburos, refrigerantes, gases nobles, líquidos iónicos, mezclas azeotrópicas y no azeotrópicas, entre otras.

El programa Refprop es utilizado en una amplia variedad de aplicaciones, como el diseño de sistemas de refrigeración, la simulación de procesos químicos y petroquímicos, la modelización de turbinas de gas y motores de combustión interna, y la optimización de procesos de separación. El programa también se utiliza en la investigación académica y en la enseñanza de termodinámica en universidades de todo el mundo.

Este software ha sido usado para poder ver y analizar gráficamente los diagramas de presión – entalpía de la parte de carga del almacenamiento y los diagramas temperatura-entropía del ciclo orgánico de Rankine. Mediante esta herramienta se ha podido comparar la campana de saturación de los distintos fluidos orgánicos ensayados y relacionar la forma de esta con las propiedades de cada uno y con los rendimientos de los ciclos.

5 MODELADO Y SIMULACIÓN

5.1 Trabajo preliminar

5.1.1 Desarrollo de modelos adicionales

Como ya se ha mencionado anteriormente, la herramienta de Model Development Kit es muy útil para poder desarrollar con exactitud los modelos deseados. A la hora de programar los ciclos, han sido necesarios incluir ciertos equipos en la biblioteca de RESTORE ya que esta está pensada para trabajar exclusivamente con fluidos orgánicos.

Para cada equipo, es necesario diseñar el icono que va a tener cada bloque, incluyendo donde están las entradas y salidas de fluidos.

Posteriormente hay que añadir los parámetros y variables que serán necesarios para definir el comportamiento del equipo. Los parámetros son valores que el programa toma como constante en todas las simulaciones, mientras que las variables te dan la opción de fijarlas con el valor deseado, o bien, calcularlas resolviendo el sistema de ecuaciones dado. IPSEpro resuelve los sistemas mediante el método de Newton, por lo que es importante estimar valores aproximados de las soluciones buscadas, para así, resolver el sistema en menos iteraciones.

Es importante saber, que en IPSEpro, cada tipo de fluido tiene un color característico. En este proyecto se usarán fluidos orgánicos, cuyo color es el amarillo, agua, cuyo color es el azul, y Therminol VP1, un aceite térmico cuyo color es el naranja. Las entradas y salidas de los distintos equipos también hacen uso de este lenguaje de colores, siendo los mismos que los mencionados anteriormente usados para las corrientes. El único que varía es el naranja del aceite térmico, que pasa a ser un verde amarronado.

A continuación, se exponen los equipos creados con esta herramienta.

- Intercambiador de agua-aceite

Se creó un intercambiador el cual tiene como entrada de fluido caliente un aceite térmico, y como entrada de fluido frío agua. Este equipo es necesario para reaprovechar el aceite sobrante del reactor, precalentando el fluido orgánico del evaporador del ciclo orgánico de Rankine y precalentando el agua que posteriormente será calentada por el fluido orgánico para alimentar las redes de frío y calor. Para hacer esto último, era necesario añadir a la biblioteca de RESTORE este intercambiador, ya que en el programa solo existen intercambiadores que trabajen alguna entrada con

un fluido orgánico.

En la Figura se aprecia cómo se muestran las diferentes herramientas que el Model Development Kit proporciona. Arriba a la izquierda está el icono del bloque, siendo los cuadrillos rellenos las entradas y los cuadrillos sin relleno las salidas. A la derecha, los parámetros (P) y variables (V) establecidos. Finalmente, en la parte inferior, se encuentran las ecuaciones que definen en su totalidad el funcionamiento del equipo, estas son:

- Balance de masa:

$$feed_{cold}^{mass} = drain_{cold}^{mass};$$

- Caídas de presión:

$$feed_{hot}^{mass} = drain_{hot}^{mass};$$

$$feed_{hot}^p - \Delta p_{hot} = drain_{hot}^p;$$

$$feed_{cold}^p - \Delta p_{cold} = drain_{cold}^p;$$

- Balance de energía:

$$feed_{hot}^{mass} * (feed_{hot}^h - drain_{hot}^h) * \left(1 - \frac{heat_{loss}}{100}\right) = q_{trans};$$

$$feed_{cold}^{mass} * (drain_{cold}^h - feed_{cold}^h) = q_{trans};$$

Para definir el coeficiente global de transferencia de calor (U) por el área de intercambio usamos la siguiente fórmula, calculando la diferencia de temperatura media logarítmica (DTLM) mediante bucles, se usa:

$$q_{trans} = htc_{area} * MTD;$$

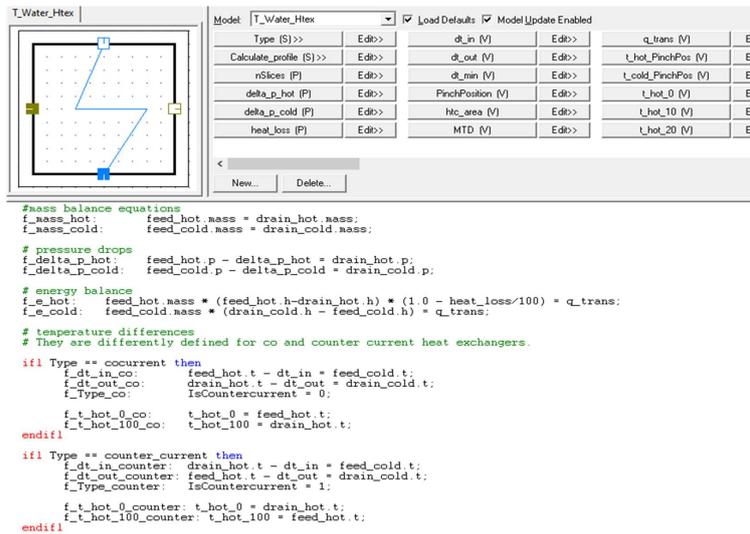


Ilustración 1. Model Development Kit para Intercambiador aceite-agua

En la [Figura x Ilustración 3](#) se ve dicho equipo aplicado al precalentamiento de agua en un ciclo orgánico de Rankine.

- Separador de aceite

Este equipo fue necesario programarlo ya que una vez más, solo había en la biblioteca separadores para fluidos orgánicos, no para aceites. Se usa para dividir corrientes de aceite para precalentar el agua que posteriormente se calentará para ser mandada a las redes de frío y calor. Es necesario dividir la corriente para que llegue a la misma temperatura a dos intercambiadores distintos y así tener el mismo salto de temperatura en ambos. Si se usase la misma corriente para ambos condensadores, la temperatura de entrada del último no sería suficiente para calentar el agua. La Figura x refleja la aplicación del separador de aceite. La Figura x refleja el funcionamiento de este.

Sus ecuaciones características son:

- Balance de masa:

$$feed^{mass} = drain_1^{mass} + drain_2^{mass};$$

- Presión constante:

$$\begin{aligned}
 feed^p &= drain_1^p; \\
 feed^p &= drain_2^p; \\
 feed^h &= drain_1^h; \\
 feed^h &= drain_2^h;
 \end{aligned}$$

Comentado [MS12]: Números de figura (o ilustración).



Ilustración 2. Model Development Kit para separador de aceite

- Válvula de 3 vías

La válvula de tres vías ya estaba creada en la biblioteca de RESTORE para trabajar con un fluido orgánico, pero no para aceites térmicos. Esta válvula, llamada por IPSEpro mixer, es usada para unir dos corrientes por las cuales circule fluidos de la misma composición. Su aplicación es volver a unir las corrientes que el separador del apartado anterior separó, como muestra la siguiente imagen.

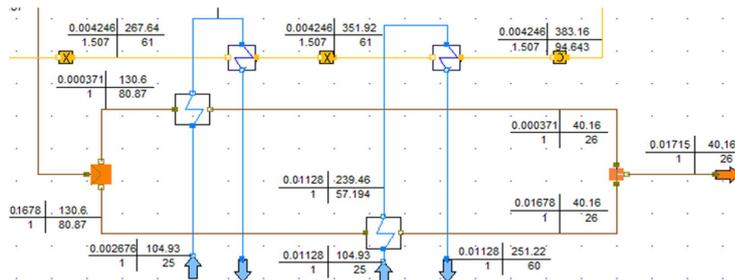


Ilustración 3. Uso de válvula de tres vías de aceite

Las ecuaciones de diseño principales de este equipo son:

- Balance de masa:

$$feed_1^{mass} + feed_2^{mass} = drain^{mass};$$

- Balance de energía:

$$feed_1^h * feed_1^{mass} + feed_2^h * feed_2^{mass} = drain^h * drain^{mass};$$

- Caída de presión en la corriente 1:

$$feed_1^p - \Delta p_1 = drain^p;$$

- Caída de presión en la corriente 2:

$$feed_2^p - \Delta p_2 = drain^p;$$

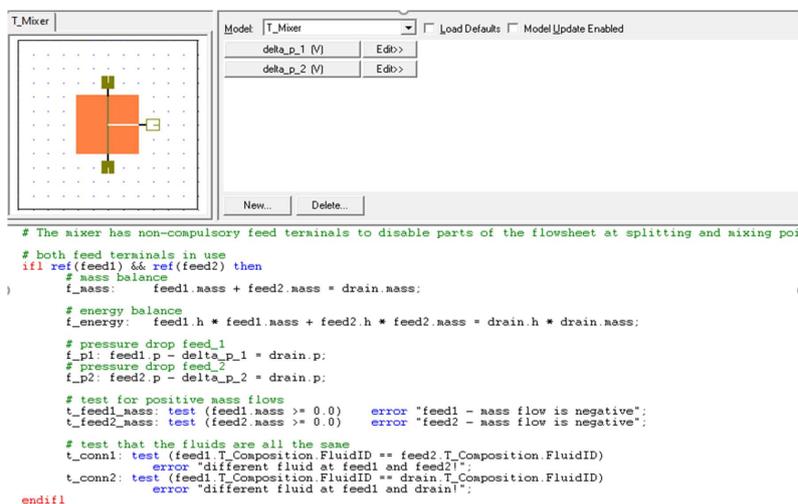


Ilustración 4. Model Development Kit para válvula de tres vías de aceite

- Calderín

El calderín es un equipo de suma importancia en este proyecto. Cobra tanto protagonismo ya que, en una de sus corrientes de salida, el fluido sale con título de vapor uno, es decir, sale como vapor saturado, y la otra con título de vapor cero, es decir, como líquido saturado. Esto es necesario para poder asegurar el correcto funcionamiento de los evaporadores y condensadores de nuestros ciclos. A la salida de un condensador debe haber título de vapor cero, mientras que a la salida de un evaporador uno. Por lo tanto, uniendo el calderín con un intercambiador podemos obtener ambos dispositivos.

Las ecuaciones que lo definen son:

- Balance de masa:

$$feed_1^{mass} + feed_2^{mass} = drain_1^{mass} + drain_2^{mass};$$

- Balance de energía:

$$feed_1^{mass} * feed_1^h + feed_2^{mass} * feed_2^h = drain_1^{mass} * drain_1^h + drain_2^{mass} * drain_2^h;$$

- Caídas y niveles de presión:

$$\begin{aligned} drain_2^p &= drain_1^p; \\ feed_1^p - \Delta p_1 &= drain_1^p; \\ feed_2^p - \Delta p_2 &= drain_2^p; \\ drain_1^t - dt_{app} &= feed_1^t; \end{aligned}$$

- Condiciones de salida

- Líquido saturado a la salida 1:

$$drain_1^h = drain_1^{Composition.o.h.px(drain_1^p, 0.0)};$$

- Vapor saturado a la salida 2:

$$drain_2^h = drain_2^{Composition.o.h.px(drain_1^p, 1.0)};$$

El lenguaje de programación usado, hace uso de "Composition.o_h_px", siendo:

- Composition.o el fluido orgánico usado.
- h la variable que calcula.
- px las variables a partir de las cuales calcula lo deseado, siendo estas la presión y el título de vapor.
- Definición de la relación de recirculación:

$$drain_1^{mass} = r_{circulation} * feed_1^{mass};$$

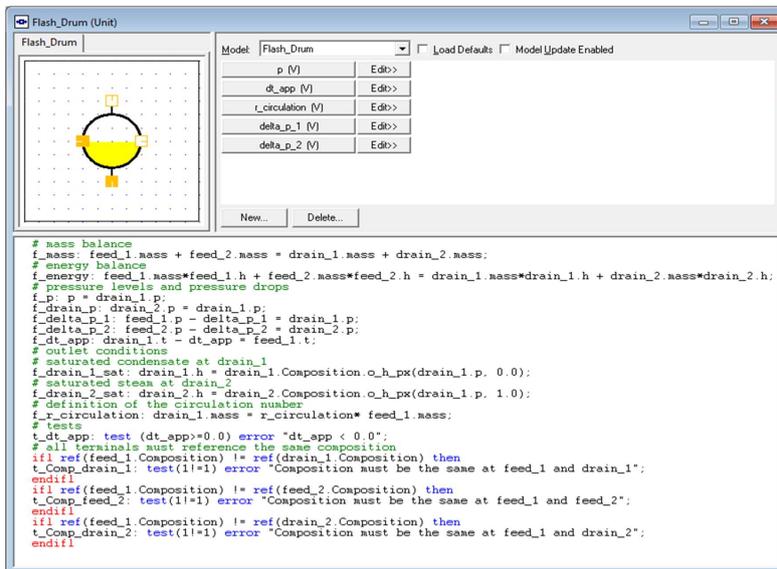


Ilustración 5. Model Development Kit para Calderín

5.1.2 Caso 1. Ciclo Base

Para comenzar a modelar los ciclos de carga y descarga del almacenamiento, se comienza por los ciclos de bomba de calor y orgánico de Rankine más sencillos posible. Esto se hace sobre todo para empezar a conocer el programa y familiarizarse con los ciclos.

En todos los ciclos modelados en este proyecto ha sido necesaria la utilización de una herramienta llamada conector. Este equipo es necesario incluirlo cuando se trabaja con ciclos cerrados, para ayudar al cálculo del balance de masa. Su icono es un cuadrado amarillo con una C en el interior. Tiene una entrada y una salida y lo que hace es igualar las presiones y entalpías en ambas. También está programado para que de error si la diferencia entre masas es mayor de 10^{-3} .

El lenguaje de colores explicado para el Model Development Kit es el mismo para el Process Simulation Environment, la herramienta con la que se modela y simula en IPSEpro.

Es importante conocer los iconos utilizados en el modelado de los ciclos. Los intercambiadores son los iconos cuadrados con una polilínea en forma de rayo en su interior. Esa línea representa unión de la entrada y la salida del fluido que se calienta. Los iconos que son cuadrados amarillos con una X en su interior sirven para fijar, o ver el título de vapor en esa corriente. Los lazos amarillos representan válvulas y los círculos conectados a un motor, como en la Ilustración 10 bombas.

Con formato: Superíndice

Con formato: Subíndice

[Finalmente el círculo amarillo conectador a un motor en la Ilustración 6 representa al compresor, mientras que el equipo conectado al generador en la Ilustración 10 es la turbina.](#)

- Bomba de calor

Las condiciones de contorno de este caso base son en la bomba de calor las siguientes:

- En la parte del condensador, el aceite térmico usado entra a 60°C y sale a 120° para mandarlo al reactor del almacenamiento térmico.
- En la parte del evaporador ~~me~~ llega agua a 90°C calentada por energía solar térmica, y sale a 25°C, para que el calor transferido sea el máximo posible, y así aprovechar esta para la refrigeración de distrito.
- El calor necesario total transferido en los condensadores es de 5 kW.

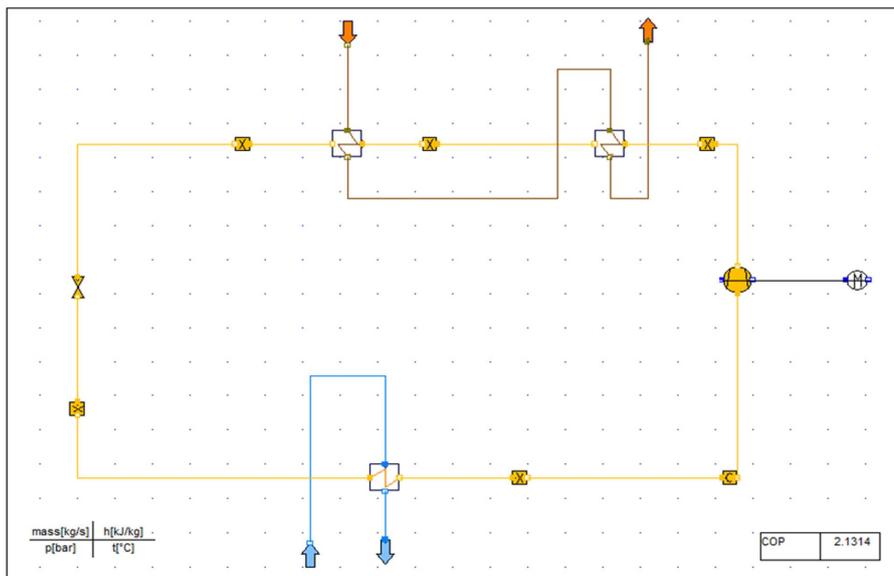


Ilustración 6. Ciclo de Bomba de Calor simple con Ciclopentano

El modelo básico de una bomba de calor lo constituye un compresor conectado a un motor, un condensador, una válvula de expansión, y el evaporador. En este caso, se han implementado dos

condensadores, uno para la transferencia de calos sensible, y otro para la latente para facilitar la resolución del programa. En la entrada caliente del condensador sensible entra el fluido orgánico siendo vapor sobrecalentado y sale como vapor saturado. Es el condensador latente, el que se encarga de llevar el fluido de vapor saturado a líquido saturado y mandarlo a la válvula de expansión. Dicha válvula disminuye la presión del fluido de manera isoentálpica hasta la presión de evaporación y a posteriori el evaporador le transfiere el calor de manera latente hasta que el fluido vuelve a ser vapor saturado. Este vapor pasa por el compresor hasta llegar a la presión de condensación.

El objetivo de este ciclo es transferir el máximo calor posible desde el condensador, consumiendo la mínima electricidad posible por el motor, siempre cumpliendo las condiciones de contorno exigidas. Esto será medido por el coeficiente de rendimiento (COP), el cual es una ratio entre el calor útil transferido y la potencia eléctrica consumida. Cuanto mayor sea dicha variable, más rendimiento tendrá el ciclo, por lo que se optimiza hasta maximizarla.

En la Figura y, podemos ver el esquema resultante la bomba de calor para el ciclopentano funcionando con las condiciones de contorno impuestas. En la parte de alta temperatura, se hace uso de dos condensadores, uno para la transferencia de calor sensible y otro para la latente. Esto será frecuente en la mayoría de ciclos modelados, ya que, al modelarlo con un solo condensador, el resultado era un intercambio de calor lineal con respecto a la temperatura, en vez de separarlo a temperatura constante en la parte latente, y el pico de la sensible.

En esta parte del proyecto se hace uso de nueve fluidos distintos, para compararlos finalmente y elegir el fluido de trabajo más adecuado. Esto es importante destacarlo ya que, al tener distintas propiedades y campanas de saturación, a algunos les hará falta incluir sobrecalentadores y subenfriadores.

En este ciclo, el sobrecalentador se encuentra entre el punto de salida del condensador y la entrada de la válvula de expansión. Su función principal es permitir que el refrigerante se sobrecaliente antes de entrar en la válvula de expansión. El sobrecalentamiento implica que el refrigerante se calienta a una temperatura superior a su temperatura de saturación correspondiente a la presión en la salida del condensador.

Existen varias razones por las cuales el uso de sobrecalentadores es necesario en el ciclo de una bomba de calor:

- Evitar la formación de líquido subenfriado: El sobrecalentamiento asegura que el refrigerante salga del condensador en estado gaseoso completamente vaporizado. Si parte del refrigerante condensado líquido llega a la válvula de expansión, puede causar problemas en el sistema, como daños a la válvula o reducción de la eficiencia de transferencia de calor en el evaporador.
- Mejorar la eficiencia del ciclo: El sobrecalentamiento permite que el refrigerante se caliente

Comentado [MS13]: Creo que es simplemente líquido o líquido saturado, no subenfriado. La inclusión de diagramas termodinámicos ayudaría a seguir las descripciones. Podrías añadir uno de la bomba de calor y otro del ciclo de potencia.

a una temperatura más alta antes de entrar en la válvula de expansión. Esto se traduce en una mayor diferencia de temperatura entre la fuente caliente y el medio frío, lo que mejora la eficiencia del ciclo de la bomba de calor.

- Estabilizar el flujo de refrigerante: El sobrecalentador ayuda a estabilizar el flujo de refrigerante hacia la válvula de expansión, evitando variaciones bruscas de temperatura y presión que podrían afectar negativamente el rendimiento del sistema.

El uso de subenfriadores en un ciclo de bomba de calor es necesario por las siguientes razones:

- Mejora de la eficiencia: En un ciclo de bomba de calor, el subenfriador ayuda a mejorar la eficiencia general del sistema al enfriar aún más el refrigerante líquido antes de que ingrese al evaporador. Al reducir la temperatura del refrigerante líquido, se disminuye la diferencia de temperatura entre el refrigerante y el medio que se desea enfriar, lo que mejora la transferencia de calor y aumenta la eficiencia del ciclo.
- Evitar la formación de burbujas de vapor en la bomba: En un ciclo de bomba de calor, el refrigerante líquido se comprime en la bomba antes de ingresar al condensador. Si el refrigerante líquido contiene burbujas de vapor, estas pueden colapsar y dañar la bomba, afectando su funcionamiento. El uso de un subenfriador ayuda a eliminar las burbujas de vapor y garantiza que el refrigerante que ingresa a la bomba esté en estado líquido, evitando problemas de cavitación y asegurando un funcionamiento adecuado de la bomba.
- Estabilidad en el proceso de condensación: El subenfriador ayuda a estabilizar el proceso de condensación del refrigerante. Al enfriar el refrigerante líquido antes de entrar en el condensador, se reduce la temperatura del vapor generado durante el proceso de condensación. Esto evita fluctuaciones de temperatura en el condensador y ayuda a mantener un rendimiento estable y consistente en el ciclo de bomba de calor.
- Control de la temperatura de salida del refrigerante: El subenfriador permite un control preciso de la temperatura del refrigerante que sale del evaporador. Esto es especialmente útil en aplicaciones donde se requiere una temperatura de salida específica, como en sistemas de climatización o en procesos industriales que necesitan un enfriamiento controlado. Al ajustar la temperatura del refrigerante líquido en el subenfriador, se puede regular la temperatura de salida y satisfacer las necesidades específicas de cada aplicación.

En el caso de Novec 649, uno de los líquidos refrigerantes ensayado, ~~es~~ necesario el uso de un subenfriador. Esto se hace para que el ciclo pueda funcionar a las presiones ligadas a las temperaturas de contorno, estando en su fase correspondiente en cada momento.

Comentado [MS14]: Creo que es la primera vez que aparece, habría que decir al menos que se trata de un líquido refrigerante...

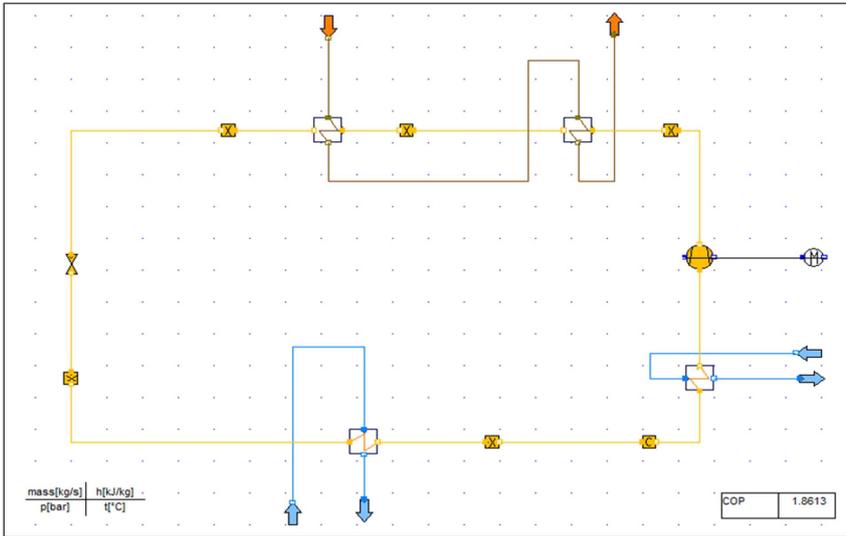


Ilustración 7. Ciclo de Bomba de Calor con sobrecalentamiento para Pentano

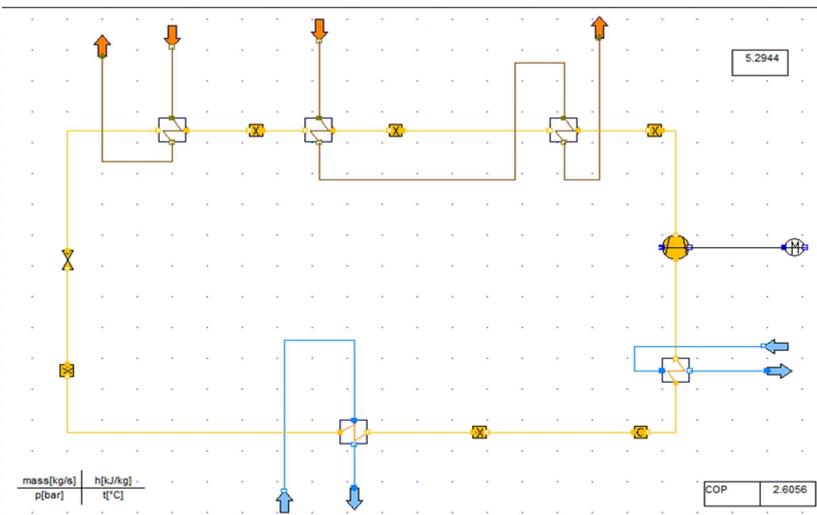


Ilustración 8. Ciclo de Bomba de Calor con sobrecalentamiento y subenfriamiento para Novec649

El próximo paso es añadir un regenerador. Este equipo es un componente que se utiliza para aumentar la eficiencia del ciclo y reducir la energía necesaria para alcanzar la temperatura deseada.

El regenerador es un intercambiador de calor que se encuentra entre el evaporador y el compresor en el ciclo de la bomba de calor. Su función es recuperar parte de la energía térmica que se encuentra en el fluido refrigerante que sale del evaporador, antes de que entre en el compresor.

El fluido refrigerante caliente que sale del compresor pasa a través del regenerador, transfiriendo parte de su calor al refrigerante frío que entra al evaporador, mejorando su eficiencia. De esta forma, el regenerador ayuda a reducir la cantidad de energía que el compresor necesita para comprimir el refrigerante y aumentar la temperatura del fluido, reduciendo así la carga térmica del sistema y aumentando su rendimiento.

Al usar el regenerador, ya sobrecalentamos y subenfriamos el fluido refrigerante por lo que no será necesario añadir esos intercambiadores.

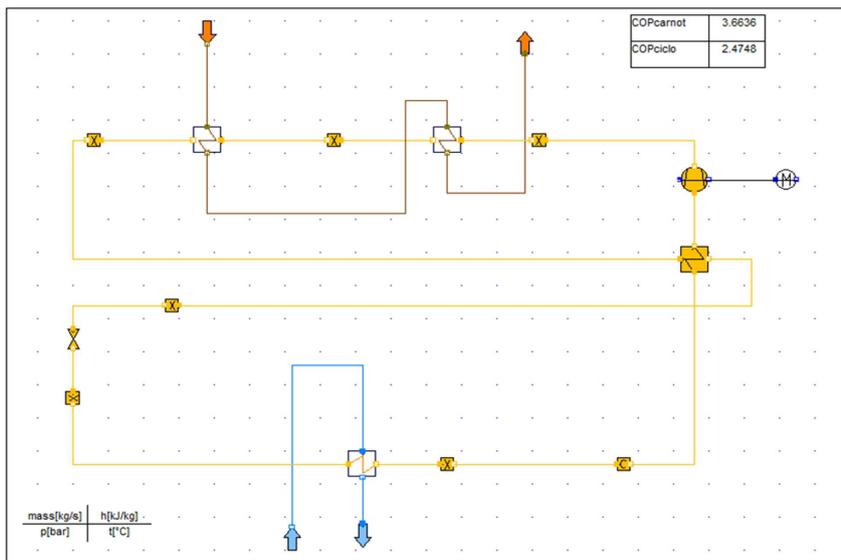


Ilustración 9. Ciclo de Bomba de Calor con regenerador para Novec649

La variable a optimizar del ciclo sigue siendo el COP mientras que ahora la variable independiente que vamos modificando para ver cuál es el rendimiento óptimo del ciclo es la fracción de vapor a la

entrada del evaporador. Este título de vapor lo que hace es modificar el calor latente intercambiado en el evaporador. También se ajustan las temperaturas de evaporización y de condensación para maximizar el coeficiente de rendimiento.

- Ciclo orgánico de Rankine

Las condiciones de contorno de este caso base son en el Ciclo Orgánico de Rankine las siguientes:

- En la parte del evaporador, el aceite térmico salido del reactor del almacenamiento térmico entra a 120°C y sale a 90°C.
- En la parte del condensador llega agua a 25°C y, calentada por el refrigerante, sale a 60°C, para ser aprovechada en forma de calor de distrito.
- El calor necesario total transferido en el evaporador es de 5 kW.

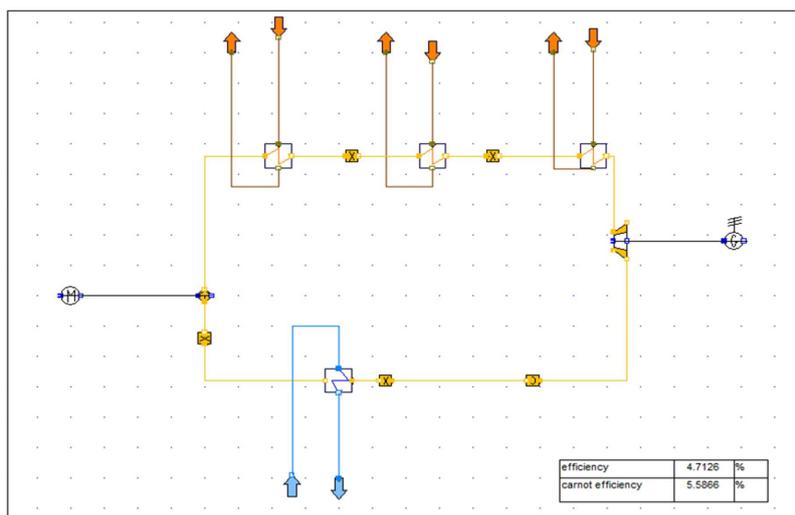


Ilustración 10. Ciclo orgánico de Rankine con sobrecalentador para Etanol

El modelo básico de ciclo orgánico de Rankine lo forman una turbina conectada a un generador, un condensador, una válvula de expansión, y el evaporador. En este caso, se han implementado dos evaporadores, uno para la transferencia de calor sensible, y otro para la latente para facilitar la resolución del programa.

El objetivo principal del ciclo es convertir el calor en energía eléctrica de manera eficiente. Este ciclo

se utiliza en sistemas de generación de electricidad, donde el calor se obtiene de una fuente caliente, en este caso el aceite térmico saliente del reactor del almacenamiento termoquímico.

El ciclo comienza con la válvula, que aumenta la presión del fluido orgánico y lo dirige al evaporador. En el evaporador, el fluido absorbe calor de una fuente caliente y se convierte en vapor de alta presión. A continuación, el vapor entra en la turbina, donde expande su energía y genera trabajo mecánico, que se transmite al generador para producir electricidad. Después de pasar por la turbina, el vapor se dirige al condensador, donde se enfría y se convierte nuevamente en líquido. En este proceso, para aprovechar el calor que se liberaría al medio ambiente, se traspa a una fuente fría de agua para calentarla y utilizarla en el calor de distrito. Finalmente, el líquido de baja presión se redirige a la válvula para reiniciar el ciclo.

La evaporación y la condensación se efectúan como procesos isobáricos. La turbina opera según el rendimiento isentrópico fijado. El rendimiento isentrópico de una turbina es una medida de la eficiencia con la que la turbina convierte la energía térmica del fluido en trabajo mecánico. Es una medida comparativa entre el trabajo real obtenido de la turbina y el trabajo máximo teórico que podría obtenerse si el proceso de expansión en la turbina fuera isentrópico, es decir, sin ninguna pérdida de energía. El rendimiento isentrópico de una turbina se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$\eta_{turbina} = \frac{W_{real\ obtenido\ de\ la\ turbina}}{W_{máximo\ teórico\ isentrópico}}$$

El trabajo real obtenido de la turbina se puede determinar midiendo la potencia mecánica de salida de la turbina. El trabajo máximo teórico isentrópico se calcula utilizando las propiedades termodinámicas del fluido, como la presión y temperatura de entrada y salida, considerando un proceso isentrópico ideal sin pérdidas.

El rendimiento isentrópico de una turbina puede variar según el diseño de la turbina, las condiciones de operación y las características del fluido. Un rendimiento isentrópico más cercano al 100% indica una mayor eficiencia de la turbina, ya que se está aprovechando la mayor cantidad posible de energía disponible en el fluido. En este caso fijamos 0.8 ya que es un valor frecuente. 0,8.

El objetivo es maximizar la eficiencia del ciclo, es decir, obtener la mayor cantidad de electricidad posible a partir del calor suministrado. Para lograr esto, se busca minimizar las pérdidas de calor y optimizar el rendimiento de los componentes del ciclo, como la turbina y el condensador.

Al igual que en el ciclo de bomba de calor, en el ciclo orgánico de Rankine también se hace uso de nuevos fluidos distintos, para compararlos finalmente y elegir el fluido de trabajo más adecuado. Esto

Comentado [MS15]: ¿Alguna justificación para fijar este valor?

es importante destacarlo ya que, al tener distintas propiedades y curvas de saturación, a algunos les hará falta incluir sobrecalentadores y subenfriadores.

En este ciclo, el uso de sobrecalentadores es necesario por varias razones:

- Mejora de la eficiencia: El objetivo principal de un sobrecalentador en el ciclo de Rankine es aumentar la temperatura del vapor generado en la caldera antes de que ingrese a la turbina de vapor. Al aumentar la temperatura, se mejora la eficiencia del ciclo, ya que se aprovecha mejor el calor suministrado a la caldera. Esto se debe a que el rendimiento de una turbina de vapor está directamente relacionado con la diferencia de temperatura entre el vapor de entrada y el de salida.
- Reducción de la humedad: El vapor generado en la caldera puede contener cierta cantidad de humedad. Al pasar a través del sobrecalentador, se elimina o reduce significativamente la humedad presente en el vapor, lo que evita posibles daños en la turbina y otros componentes debido a la erosión o corrosión causadas por las gotas de agua.
- Aumento de la capacidad de generación: Al utilizar un sobrecalentador, se incrementa la temperatura del vapor de salida de la caldera, lo que permite obtener un mayor rendimiento de la turbina y, por lo tanto, generar más energía eléctrica. Esto es especialmente importante en sistemas de generación de energía donde se busca maximizar la capacidad de producción.
- Mayor flexibilidad operativa: El uso de sobrecalentadores permite ajustar la temperatura del vapor de acuerdo con las necesidades de carga y las condiciones de operación de la planta. Esto brinda mayor flexibilidad para adaptarse a cambios en la demanda de energía y optimizar el rendimiento del ciclo.

El uso de subenfriadores también es importante por las siguientes razones:

- Mejora de la eficiencia: Al igual que los sobrecalentadores, los subenfriadores tienen como objetivo mejorar la eficiencia del ciclo. Después de pasar por la turbina de vapor, el vapor puede contener cierta cantidad de calor remanente. Al enfriar este vapor en el subenfriador, se reduce su temperatura y se aprovecha mejor el calor contenido en él. Esto permite extraer más energía térmica y, en consecuencia, mejorar la eficiencia del ciclo.
- Evitar la formación de condensado en la bomba de alimentación: En el ciclo de Rankine, el vapor enfriado en el subenfriador se dirige a la bomba de alimentación, donde se comprime para volver a la caldera. Si el vapor que entra en la bomba está cerca o por debajo de su punto de condensación, puede formarse condensado en la bomba, lo cual es indeseable y puede dañar su funcionamiento. El uso de un subenfriador ayuda a enfriar el vapor antes de llegar a la bomba, evitando así la condensación y garantizando un funcionamiento adecuado.

- Reducción de pérdidas de calor en el condensador: Después de pasar por el subenfriador, el vapor se condensa en el condensador para completar el ciclo. Si el vapor llega al condensador a una temperatura más baja, se reducen las pérdidas de calor en el proceso de condensación. Esto mejora la transferencia de calor entre el vapor y el medio de enfriamiento en el condensador, lo que a su vez aumenta la eficiencia global del ciclo.
- Control de la temperatura de salida del condensador: El subenfriador proporciona un medio para controlar la temperatura de salida del condensador. Esto es especialmente útil en aplicaciones donde se requiere un control preciso de la temperatura, como en sistemas de cogeneración o en plantas de energía que suministran calor residual a procesos industriales. El uso del subenfriador permite ajustar la temperatura del vapor condensado según las necesidades específicas de cada aplicación.

La siguiente imagen muestra el ciclo modelado para el refrigerante Novec649. Para este refrigerante, debido a la forma tan estrecha e inclinada de su campana de saturación, es necesario implementar el uso de un sobrecalentador y de un subenfriador.

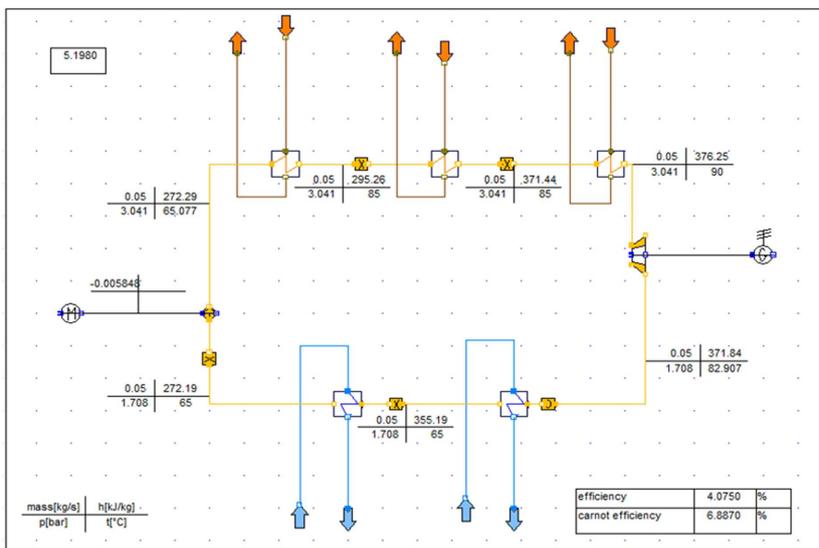


Ilustración 11. Ciclo orgánico de Rankine con sobrecalentador y subenfriado para Novec 649

Comentado [MS16]: ¿Hay alguna diferencia entre Novec 64 y 649 (más arriba en este documento)?

Comentado [MS17R16]: Pendiente de aclaración

Comentado [MS18]: A medida que se van complicando los diagramas, resulta más difícil su interpretación. Si no fuera mucho trabajo, se podrían superponer etiquetas que indicasen la denominación de los equipos.

Comentado [MS19R18]: En tu email me dices que has explicado los iconos. Veo que has incluido esa explicación en la página 36. Sigue siendo un poco incómodo de interpretar, pero puedes dejarlo así.

A diferencia de la bomba de calor, el equipo implementado en este ciclo de potencia se denomina recuperador, no regenerador. La diferencia en los términos utilizados, "regenerador" en una bomba de calor y "recuperador" en un ciclo orgánico de Rankine, se debe a las características y funciones particulares de cada uno de estos sistemas.

En una bomba de calor, el regenerador se refiere a un componente específico del sistema que permite transferir calor de un flujo de fluido caliente a un flujo de fluido frío, sin que ambos flujos se mezclen directamente. El regenerador se utiliza para aumentar la eficiencia del ciclo, ya que permite recuperar parte del calor del fluido de descarga y transferirlo al fluido de entrada. Esto se logra mediante un intercambiador de calor que permite el intercambio de calor entre los dos flujos sin una mezcla completa, lo que reduce las pérdidas de calor.

Por otro lado, en un ciclo orgánico de Rankine, se utiliza el término "recuperador" para referirse a un componente similar, pero con una función diferente. El recuperador en un ciclo orgánico de Rankine permite el intercambio de calor entre los fluidos de alta y baja presión en la turbina y en la caldera. Su objetivo principal es mejorar la eficiencia del ciclo al aprovechar el calor residual en los gases de escape de la turbina para precalentar el fluido que entra en la caldera. Esto permite un mayor aprovechamiento de la energía térmica disponible y aumenta la eficiencia general del ciclo.

Aquí se presentan algunos efectos positivos de un recuperador en un ciclo orgánico de Rankine son:

- Aumento de la eficiencia térmica: El recuperador permite recuperar parte del calor residual del fluido de escape antes de ser liberado al ambiente. Este calor recuperado se utiliza para precalentar el fluido de entrada al evaporador, lo que reduce la demanda de calor de la fuente de calor primaria y aumenta la eficiencia térmica del ciclo.
- Reducción del consumo de combustible: Al aprovechar el calor residual, un recuperador puede reducir la necesidad de quemar más combustible para generar el calor requerido en el ciclo. Esto puede resultar en ahorros significativos de combustible y, por lo tanto, en una operación más eficiente y económica.
- Mejora en la capacidad de generación de energía: Al aumentar la eficiencia del ciclo, el uso de un recuperador puede aumentar la capacidad de generación de energía de un sistema de ciclo orgánico de Rankine. Esto puede ser especialmente beneficioso en aplicaciones de cogeneración, donde se busca maximizar tanto la generación de energía eléctrica como la producción de calor útil.

Con formato: Sangría: Izquierda: 0 cm

Con formato: Con viñetas + Nivel: 1 + Alineación: 1,17 cm + Sangría: 1,8 cm

- Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero: Al reducir el consumo de combustible y mejorar la eficiencia del ciclo, el uso de un recuperador puede contribuir a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Esto es especialmente relevante en el contexto de la sostenibilidad y la mitigación del cambio climático.

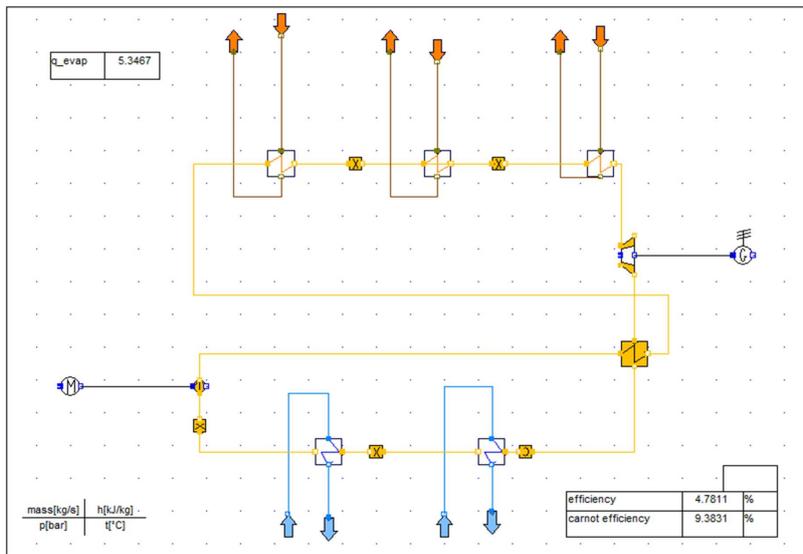


Ilustración 12. Ciclo Orgánico de Rankine con recuperador para Novec6

5.2 Caso Realizado

En este apartado se procede a utilizar los casos bases y desarrollarlos de tal forma que cumplan las nuevas condiciones de contorno, que sean lo más eficientes posibles y tratando de aprovechar lo máximo posible los fluidos caloportadores. Se trata de resolver el problema utilizando los conocimientos expuestos anteriormente.

5.2.1 Diseño

- Bomba de calor

Las condiciones de contorno del ciclo de bomba de calor simple y usando un regenerador en la parte de alta presión son las siguientes:

- En la parte del condensador, el aceite térmico usado entra a 115°C y sale a 120° para mandarlo al reactor del almacenamiento térmico.
- En la parte del evaporador ~~me~~ llega agua a 120°C calentada por energía solar térmica, y sale a 50°C, para que el calor transferido sea el máximo posible.
- El calor necesario total transferido en los condensadores es de 5 kW.

En los próximos modelos aplicaremos evaporadores intermedios. La utilización de un evaporador intermedio en un ciclo de bomba de calor es una estrategia técnica que permite mejorar la eficiencia y el rendimiento de dicho sistema. Un evaporador intermedio se inserta entre el evaporador principal y el compresor, desempeñando un papel crucial en el proceso de transferencia de calor y la eficiencia energética general del sistema.

En un ciclo de bomba de calor convencional, el evaporador principal es responsable de absorber el calor del medio ambiente o de una fuente térmica, como el aire o el agua. Sin embargo, en ciertos escenarios, el evaporador principal puede estar sometido a condiciones desfavorables, como temperaturas extremadamente bajas o fluctuaciones de temperatura significativas. Estas condiciones pueden comprometer la eficiencia y el rendimiento del evaporador, lo que resulta en una reducción del rendimiento global del sistema de bomba de calor.

Aquí es donde entra en juego el evaporador intermedio. Su función principal es recibir el refrigerante de la salida del evaporador principal y proporcionar una transferencia de calor adicional antes de que el refrigerante se dirija al compresor. Esto permite aprovechar el calor residual presente en el refrigerante y mejorar la eficiencia general del sistema.

El evaporador intermedio actúa como un intercambiador de calor adicional y proporciona una

mayor superficie de transferencia térmica. Esto ayuda a maximizar la absorción de calor y, al mismo tiempo, reduce la carga térmica del evaporador principal. Al reducir la carga térmica en el evaporador principal, se mejora la eficiencia del ciclo de refrigeración, lo que resulta en un consumo energético más bajo y un rendimiento general mejorado. En este caso, además, nos ayuda a bajar la temperatura del refrigerante que cruza el evaporador principal, ya que el salto de temperaturas en el intercambiador puede ser a temperaturas más bajas porque el agua entrante llega a 88 grados en vez de a 120.

Además, el uso de un evaporador intermedio también contribuye a evitar situaciones indeseables, como la formación de hielo o la condensación excesiva en el evaporador principal. Estos problemas pueden surgir cuando el evaporador principal opera en condiciones extremas o cuando se produce una sobrecarga de calor. Al proporcionar una etapa adicional de enfriamiento y control de temperatura, el evaporador intermedio ayuda a prevenir estos problemas y garantiza un funcionamiento estable y confiable del sistema de bomba de calor.

También, la capacidad de utilizar múltiples fuentes de calor es un enfoque muy eficiente y versátil en la implementación de sistemas de bomba de calor. El evaporador intermedio juega un papel fundamental en este proceso, ya que actúa como un punto de conexión entre las dos fuentes de calor y el compresor.

Al disponer de dos corrientes de agua a diferentes temperaturas, se puede aprovechar al máximo el potencial energético de ambas fuentes renovables. Por ejemplo, si ~~tiene~~ se dispone de una fuente de calor de baja temperatura, como un sistema solar térmico, que calienta agua a una temperatura moderada, y otra fuente de calor de alta temperatura, como un sistema geotérmico, que proporciona agua a una temperatura más elevada, el evaporador intermedio permitirá combinar estas dos corrientes y utilizarlas de manera eficiente. Esta configuración proporciona flexibilidad en la adaptación del sistema a las condiciones cambiantes de las fuentes de calor. Si una fuente de calor tiene una disponibilidad limitada o experimenta fluctuaciones en la temperatura, el uso de una segunda fuente de calor permite compensar estas variaciones y mantener un suministro constante y confiable de calor al sistema. Otro aspecto importante es la diversificación de las fuentes de energía renovable utilizadas. Al aprovechar dos fuentes distintas de calor, reduces la dependencia de una sola fuente y aumentas la resiliencia y la sostenibilidad del sistema en general. Esto es especialmente valioso en proyectos que buscan minimizar el impacto ambiental y promover la utilización de energías renovables.

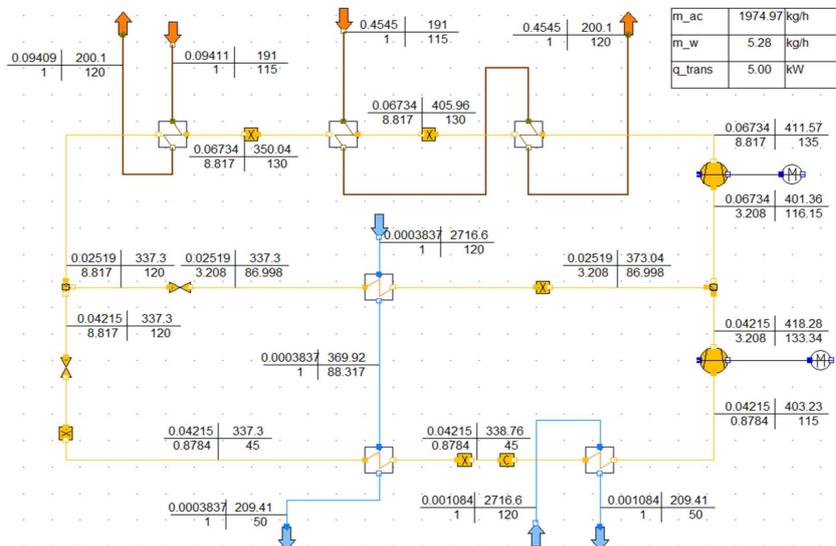


Ilustración 13. Ciclo de bomba de Calor simple

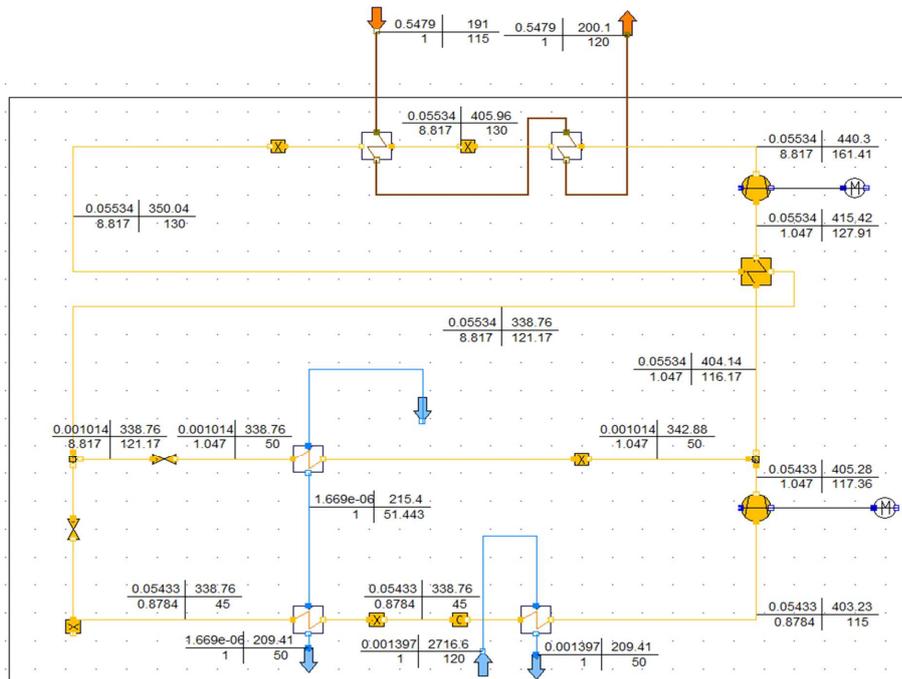


Ilustración 14 Ciclo de Bomba de Calor con regenerador en la parte de alta temperatura para Novec649

Las condiciones de contorno del ciclo de bomba usando un regenerador en la parte de baja temperatura, usando dos regeneradores, y usando un solo regenerador que intercambia calor entre la parte de alta temperatura con la de baja son las siguientes:

- En la parte del condensador, el aceite térmico usado entra a 115°C y sale a 120° para mandarlo al reactor del almacenamiento térmico.
- En la parte del evaporador me llega agua a 120°C calentada por energía solar térmica, y sale a 25°C, para que el calor transferido sea el máximo posible.
- El calor necesario total transferido en los condensadores es de 5 kW.

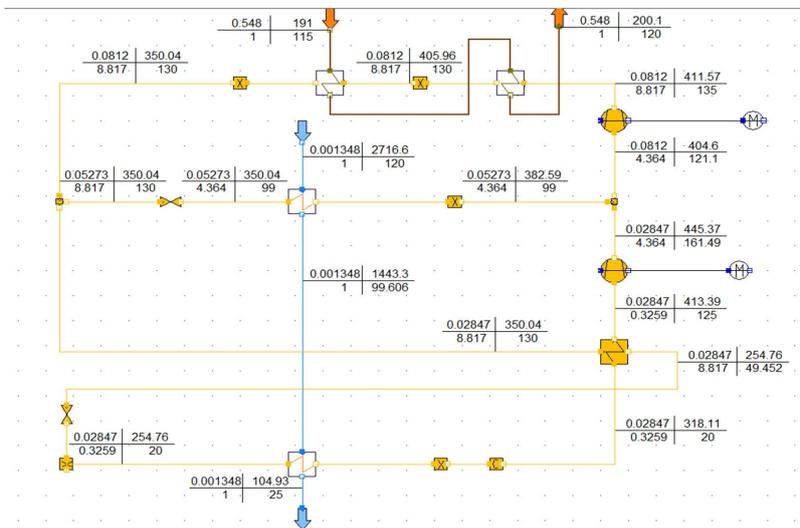


Ilustración 15. Ciclo de Bomba de Calor con regenerador en la parte de baja temperatura para Novec649

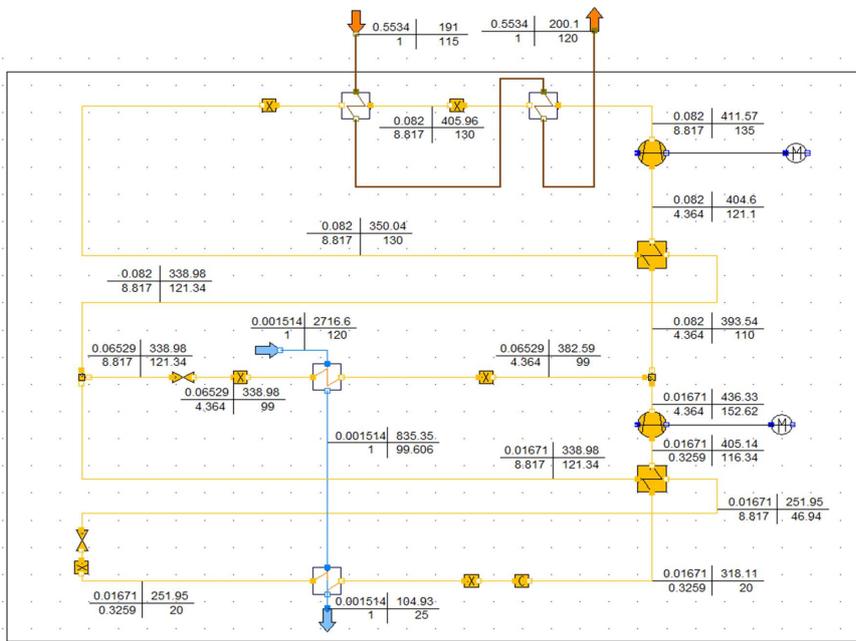


Ilustración 16. Ciclo de Bomba de Calor con dos regeneradores para Novec649

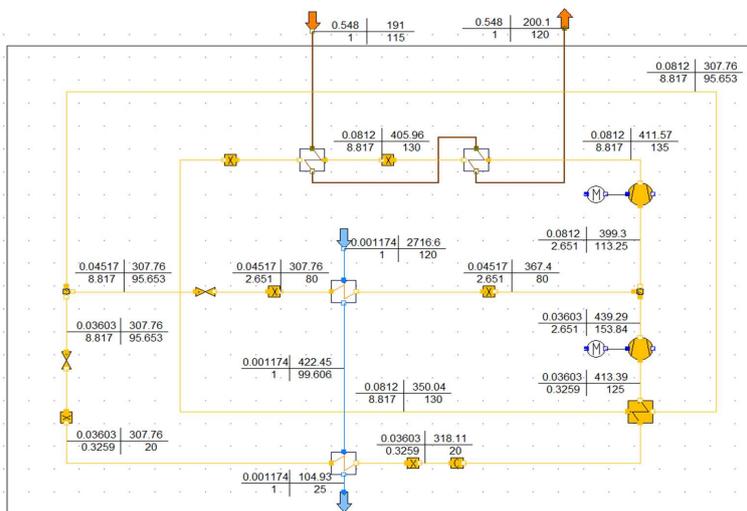


Ilustración 17. Ciclo de Bomba de Calor con regenerador conectado a la parte de alta y a la de baja temperatura.

La utilización del aceite residual proveniente de un reactor termoquímico del sistema de

Comentado [MS20]: Creo que es la primera vez que se habla de aceite residual. ¿De qué reactor termoquímico (supongo que del sistema de almacenamiento) se trata y cuáles son sus características?

[almacenamiento](#) para calentar el refrigerante a la salida de los evaporadores, tanto el intermedio como el de baja temperatura, en un ciclo de bomba de calor, representa una estrategia altamente efectiva y beneficiosa. Esta aplicación específica del aceite residual como fuente de calor adicional proporciona importantes ventajas en términos de eficiencia energética y aprovechamiento de recursos.

[Este aceite es Therminol VP1, y sale del reactor a 120°C y a 1 atm. Se hace uso de este aceite ya es un fluido caloportador de gran calidad. A continuación, se presentan algunas de las ventajas y beneficios del Therminol VP1:](#)

- [Puede operar en un amplio rango de temperaturas, desde -26°C hasta 400°C, haciéndolo adecuado para aplicaciones de transmisión de calor a bajas y a altas temperaturas.](#)
- [Tiene una excelente estabilidad térmica. Esto significa que mantiene sus propiedades y rendimientos durante largos periodos. Así, prolonga la vida útil del fluido y reduce los gastos de mantenimiento.](#)
- [Tiene grandes propiedades termofísicas por lo que proporciona una transferencia de calor rápida y eficiente, mejorando la eficiencia energética de los sistemas y reduciendo los tiempos de calentamiento y enfriamiento.](#)
- [Este aceite es compatible con una amplia gama de materiales utilizados comúnmente en sistemas de transferencia de calor, como el acero al carbono, aceros inoxidable, cobres, metales no ferrosos...](#)
- [El Therminol VP1 tiene una baja toxicidad y cumple con las normativas de seguridad y medioambientales. Esto hace que sea seguro de manejar y reduce los riesgos para la salud de los operarios y el impacto medioambiental.](#)

Con formato: Con viñetas + Nivel: 1 + Alineación: 2,5 cm + Sangría: 3,13 cm

El aceite residual generado en el proceso del reactor termoquímico, al tratarse de un subproducto de una actividad industrial, es una fuente de energía potencialmente valiosa. En lugar de desecharlo o tratarlo como un residuo, es posible utilizarlo de manera eficiente y sostenible para generar calor útil en el ciclo de la bomba de calor.

El precalentamiento del refrigerante a través del uso del aceite residual se lleva a cabo mediante la integración del sistema de suministro de calor residual con el circuito de la bomba de calor. El aceite residual, que tiene una temperatura de 120 grados debido a la naturaleza del proceso termoquímico, se canaliza a través de un intercambiador de calor donde transfiere su calor al refrigerante que sale de los evaporadores intermedio y de baja temperatura.

Este intercambio de calor adicional en el calentamiento del refrigerante proporciona múltiples beneficios. En primer lugar, permite aprovechar de manera eficiente la energía térmica contenida en el aceite residual, lo que reduce la necesidad de utilizar otras fuentes de energía convencionales. Esto resulta en una disminución en el consumo de energía y, por ende, en una reducción de costos operativos.

Además, el calentamiento del refrigerante utilizando el aceite residual aumenta la eficiencia general del ciclo de la bomba de calor al reducir la carga térmica requerida para alcanzar las temperaturas deseadas. Al introducir calor adicional al refrigerante antes de que este ingrese al compresor, se disminuye la cantidad de trabajo que el compresor debe realizar para elevar la temperatura. Esto conlleva una mejora en la eficiencia energética del sistema, ya que se necesita menos energía para alcanzar las condiciones de temperatura requeridas.

Otro aspecto importante es la minimización del impacto ambiental. Al aprovechar el aceite residual como fuente de calor adicional, se evita su descarte y se reduce la necesidad de utilizar combustibles fósiles o energía eléctrica generada por fuentes convencionales. Esto contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y promueve la sostenibilidad ambiental.

Es importante destacar que la integración del aceite residual en el ciclo de la bomba de calor requiere un diseño cuidadoso y un sistema de intercambio de calor eficiente. Se deben considerar aspectos técnicos como la compatibilidad de los materiales, la capacidad de transferencia de calor y la seguridad operativa. Además, se deben implementar controles y regulaciones adecuados para garantizar un funcionamiento seguro y confiable del sistema.

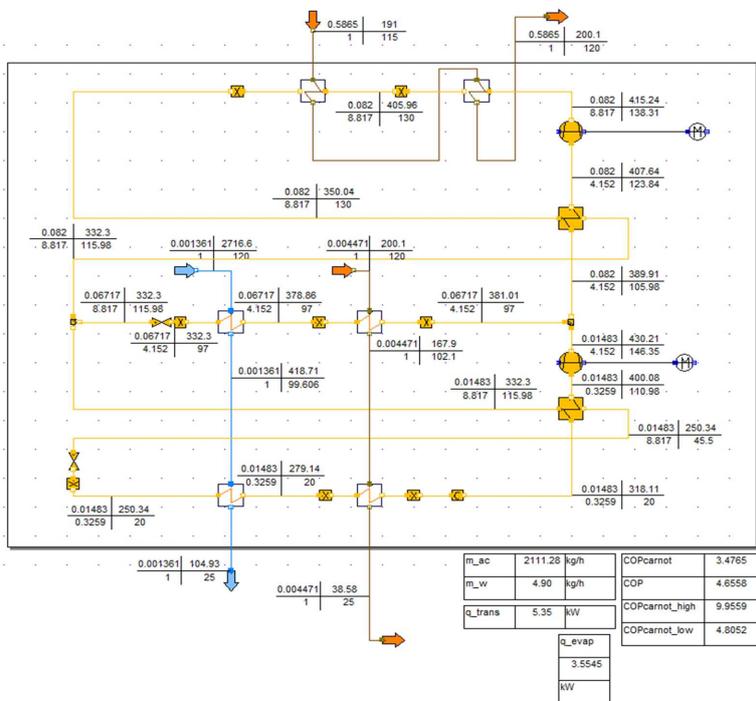


Ilustración 18. Ciclo de Bomba de Calor con dos regeneradores para Novец649 reaprovechando aceite y agua

- Ciclo orgánico de Rankine

Las condiciones de contorno de este caso base son en el Ciclo Orgánico de Rankine las siguientes:

- En la parte del evaporador, el aceite térmico salido del reactor del almacenamiento térmico entra a 120°C y sale a 115°C.
- En la parte del condensador llega agua a 25°C y, calentada por el refrigerante, sale a 60°C, para ser aprovechada en forma de calor de distrito.
- El calor necesario total transferido en el evaporador es de 5 kW.

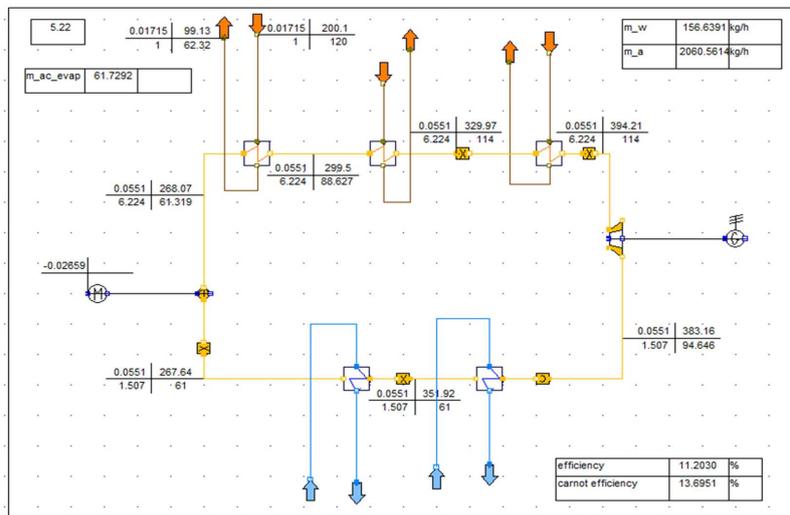


Ilustración 19. Ciclo Orgánico de Rankine aprovechando aceite en el evaporador

Comentado [MS21]: En todos los esquemas sin incluyen la eficiencia y la eficiencia de Carnot. Habría que explicar, al principio, qué se entiende por rendimiento de Carnot (¿es el rendimiento exergético o el de un ciclo de Carnot operando entre las mismas temperaturas extremas?)

Con formato: Sangría: Izquierda: 0 cm

La integración de un ciclo orgánico de Rankine, compuesto por un evaporador, condensador, turbina y válvula, con la utilización de aceite residual proveniente de un reactor termoquímico para el precalentamiento del agua que ingresa al condensador y del fluido orgánico antes de entrar en el evaporador, representa una opción altamente interesante y ventajosa desde el punto de vista de eficiencia energética y aprovechamiento de recursos.

El aceite residual generado como subproducto en el proceso termoquímico posee un contenido calórico significativo debido a su origen y composición. En lugar de considerarlo simplemente como un residuo a desechar, su aprovechamiento como fuente de calor en el ciclo de Rankine orgánico permite utilizarlo de manera eficiente y sostenible, maximizando su potencial energético.

En primer lugar, el precalentamiento del agua que ingresa al condensador utilizando el aceite residual tiene múltiples beneficios. El agua en condiciones normales de temperatura y presión puede requerir una gran cantidad de energía para alcanzar la temperatura necesaria para la condensación eficiente del fluido de trabajo. Al utilizar el aceite residual como fuente de calor adicional, se aprovecha su temperatura relativamente alta para elevar la temperatura del agua antes de que entre al condensador. Esto reduce la carga térmica que el condensador debe manejar y, en consecuencia, aumenta la eficiencia general del ciclo de Rankine.

En segundo lugar, el precalentamiento del fluido orgánico antes de ingresar al evaporador también se beneficia del uso del aceite residual. El fluido orgánico, que actúa como medio de transferencia de calor en el ciclo de Rankine, puede requerir una temperatura inicial para garantizar una buena eficiencia en el intercambio de calor con la fuente de calor primaria. Al aprovechar el calor residual del aceite, se puede aumentar la temperatura del fluido orgánico antes de que este ingrese al evaporador, lo que mejora la eficiencia y reduce la carga térmica que debe ser manejada por el evaporador.

La incorporación del aceite residual como fuente de calor adicional en el ciclo de Rankine orgánico tiene ventajas adicionales. En primer lugar, permite aprovechar un recurso que de otro modo se desperdiciaría, lo que implica una mejora significativa en la eficiencia energética y la sostenibilidad del proceso. Además, el uso del aceite residual contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y minimiza el impacto ambiental al evitar su descarte o incineración.

Es importante mencionar que la implementación exitosa de esta integración requiere un diseño cuidadoso y una selección adecuada de equipos y materiales. Se deben considerar aspectos técnicos como la compatibilidad del aceite residual con el sistema, la capacidad de transferencia de calor, la seguridad operativa y la necesidad de sistemas de control y regulación apropiados.

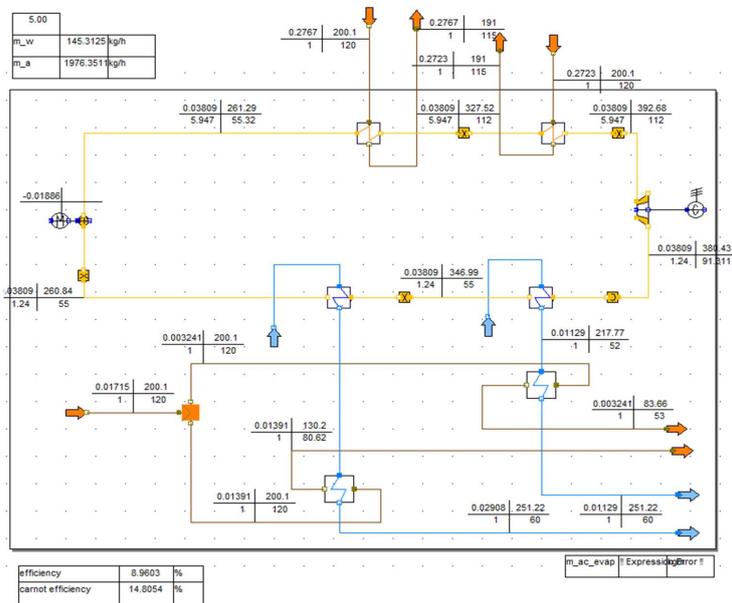


Ilustración 20. Ciclo Orgánico de Rankine aprovechando aceite precalentando agua

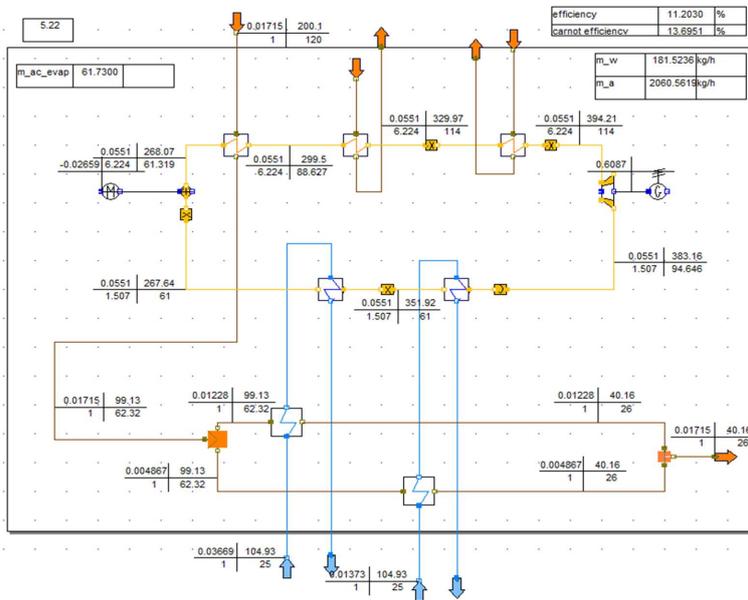


Ilustración 21. Ciclo Orgánico de Rankine aprovechando aceite en evaporador y precalentando agua

El uso de un condensador intermedio en un ciclo orgánico de Rankine es una estrategia altamente efectiva y beneficiosa para mejorar la eficiencia y el rendimiento global del sistema. En este tipo de ciclo, el condensador intermedio se sitúa entre la turbina y el condensador principal y desempeña un papel fundamental en la optimización de la transferencia de calor y en el aumento de la eficiencia energética.

El condensador intermedio actúa como un punto de transferencia de calor adicional en el ciclo orgánico de Rankine. Su función principal es recibir el vapor de escape de baja presión proveniente de la turbina y condensarlo para convertirlo nuevamente en líquido antes de que ingrese al condensador principal.

La inclusión del condensador intermedio presenta una serie de ventajas significativas. En primer lugar, permite recuperar y reutilizar una mayor cantidad de energía térmica del vapor de escape de la turbina. Al condensar el vapor antes de que llegue al condensador principal, se extrae una cantidad adicional de calor del fluido de trabajo y se transfiere al medio de enfriamiento, generalmente agua de refrigeración. Esto maximiza la eficiencia del ciclo al aprovechar al máximo la energía térmica disponible.

Además, el condensador intermedio proporciona una mayor diferencia de temperatura entre el fluido de trabajo y el medio de enfriamiento, lo que mejora la transferencia de calor y aumenta la eficiencia global del sistema. Al condensar el vapor de baja presión a una temperatura más baja, se crea una mayor diferencia de temperatura entre el fluido de trabajo y el medio de enfriamiento, lo que resulta en una mayor transferencia de calor y, en última instancia, en un rendimiento mejorado del ciclo.

Otra ventaja del condensador intermedio es su capacidad para reducir las pérdidas de presión en el condensador principal. Al condensar el vapor de baja presión en un punto intermedio, se reduce la carga térmica y la presión que debe ser manejada por el condensador principal. Esto ayuda a disminuir las pérdidas de presión en el condensador principal, lo que a su vez mejora la eficiencia y reduce la carga de trabajo del sistema.

El diseño y la implementación de un condensador intermedio requieren consideraciones técnicas específicas. Se deben tener en cuenta factores como el dimensionamiento adecuado del intercambiador de calor, la selección de materiales resistentes a la corrosión, la gestión adecuada del flujo de agua de enfriamiento y la implementación de controles y regulaciones para garantizar un funcionamiento óptimo y seguro del sistema.

Dentro de los beneficios de la implementación de este equipo al modelo, destaca la capacidad de generar agua a dos temperaturas distintas, lo cual resulta altamente interesante y versátil en términos de aplicaciones de calefacción urbana.

En un ciclo orgánico de Rankine, el condensador intermedio se encuentra ubicado entre la turbina y el condensador principal. Su función principal es condensar el vapor de escape de baja presión proveniente de la turbina para convertirlo nuevamente en líquido. Aprovechando esta funcionalidad, es posible utilizar el condensador intermedio para generar agua caliente a dos temperaturas diferentes.

El proceso de generación de agua a dos temperaturas distintas se logra mediante la implementación de un sistema de intercambio de calor adecuado en el condensador intermedio. El vapor de escape de baja presión, al pasar por el condensador intermedio, cede su calor al medio de enfriamiento, generalmente agua. La transferencia de calor se lleva a cabo en dos etapas, permitiendo así obtener dos corrientes de agua a temperaturas diferentes.

La ventaja clave de generar agua para producir calor de distrito a dos temperaturas distintas es la posibilidad de atender diferentes requerimientos de temperatura en una red de calefacción urbana. Por ejemplo, una corriente de agua a una temperatura más alta puede ser utilizada para satisfacer la demanda de calefacción en edificios residenciales, comerciales e industriales, mientras que una corriente de agua a una temperatura más baja puede ser empleada para aplicaciones de calefacción

de menor demanda, como calentamiento de agua sanitaria o calefacción en espacios de menor tamaño.

Esta flexibilidad en la generación de agua a diferentes temperaturas permite un aprovechamiento eficiente de la energía térmica disponible en el ciclo orgánico de Rankine. Al adaptar la temperatura del agua suministrada a las necesidades específicas de cada aplicación, se evita el desperdicio de calor y se optimiza el rendimiento global del sistema.

Además, la generación de agua a dos temperaturas distintas contribuye a la eficiencia energética al reducir la necesidad de ajustar la temperatura del agua utilizando sistemas adicionales de mezcla o de generación de calor suplementario. Al contar con dos corrientes de agua a temperaturas predefinidas, se minimiza la pérdida de calor en el proceso de mezcla y se evitan ineficiencias asociadas a la modulación de temperatura en tiempo real.

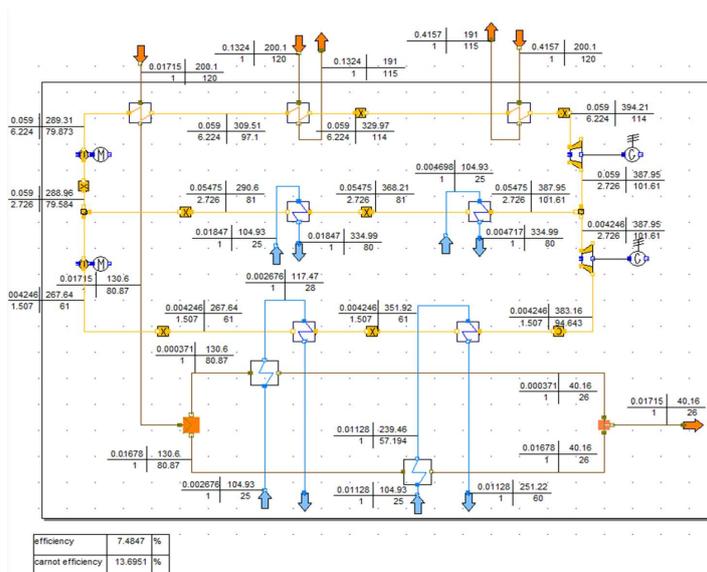


Ilustración 22. Ciclo Orgánico de Rankine con dos condensadores y aprovechando aceite

5.2.2 Cargas Parciales

- Bomba de calor

La modelación de un ciclo de bomba de calor, ya sea en condiciones de diseño o a carga parcial, implica considerar diversas variables y parámetros que afectan el rendimiento y la eficiencia del sistema. Estas diferencias son de gran relevancia, ya que permiten comprender

y optimizar el funcionamiento de la bomba de calor en diferentes escenarios de operación.

En condiciones de diseño, se busca obtener un modelo que represente las características óptimas del ciclo de bomba de calor cuando opera en plena capacidad. En este caso, se asumen condiciones ideales y constantes, como una carga térmica total definida, temperaturas de entrada y salida de los fluidos de trabajo fijas, y un flujo de trabajo estable. El objetivo principal es determinar los parámetros de diseño óptimos, tales como las capacidades de los componentes, las temperaturas de evaporación y condensación, y los flujos de trabajo.

La modelación del ciclo de bomba de calor en condiciones de diseño implica utilizar ecuaciones termodinámicas y modelos matemáticos para determinar los coeficientes de transferencia de calor, la potencia requerida por el compresor y la eficiencia del ciclo en general. Además, se deben considerar las características de los componentes individuales, como el compresor, el evaporador y el condensador, así como las propiedades termodinámicas de los fluidos de trabajo utilizados.

Por otro lado, la modelación de un ciclo de bomba de calor a carga parcial implica simular su comportamiento bajo condiciones de operación variables. En este caso, la carga térmica puede fluctuar y las temperaturas de entrada y salida de los fluidos pueden variar en función de la demanda térmica real. Esto implica una mayor complejidad en el modelo, ya que se deben tener en cuenta los cambios en las condiciones de operación y adaptar el funcionamiento de la bomba de calor en consecuencia.

La modelación a carga parcial requiere de estrategias de control más sofisticadas para optimizar la eficiencia energética del sistema. Se utilizan algoritmos de control que ajustan la velocidad del compresor, la capacidad del evaporador y otros parámetros operativos en tiempo real, con el fin de adaptarse a la carga térmica variable y mantener un rendimiento óptimo. Esto implica considerar el comportamiento dinámico del sistema y la interacción entre los diferentes componentes.

El calderín cumple un papel fundamental al separar el vapor del refrigerante del líquido no evaporado, lo que garantiza un intercambio de calor más eficiente y un rendimiento óptimo del ciclo de la bomba de calor. [Se empieza a utilizar en los ciclos simulados a cargas parciales ya que las variables que se imponen en esta parte del trabajo son las variables de los equipos seleccionados en el simulado en condiciones de diseño. Esto supone que no se puede fijar ningún título de vapor en el ciclo, y el calderín es el equipo perfecto para facilitar esto, ya que cumple sus salidas son una de título de vapor cero y la otra de uno.](#)

En una bomba de calor, el calderín se encuentra entre el evaporador y el compresor, y también entre el compresor y el condensador. Su principal función es recibir el flujo de vapor saturado

proveniente del evaporador y separar el vapor del refrigerante del líquido no evaporado. Esto asegura que solo el vapor se dirija al compresor, lo que es esencial para un funcionamiento adecuado del compresor y evita que el líquido no evaporado ingrese a esta etapa del ciclo, lo cual podría ocasionar daños y afectar la eficiencia general de la bomba de calor.

En el calderín, el vapor y el líquido se separan gracias a las diferencias de densidad. El vapor, al ser más liviano, tiende a ascender y se recoge en la parte superior del calderín, mientras que el líquido más pesado se acumula en la parte inferior. La geometría del calderín facilita esta separación, permitiendo que el vapor se dirija hacia el compresor y que el líquido se retire a través de una salida independiente.

El uso del calderín en una bomba de calor ofrece varias ventajas. En primer lugar, permite que el vapor del refrigerante llegue al compresor con un alto grado de calidad, maximizando así la eficiencia del compresor y, por lo tanto, la capacidad de bombeo de calor. Además, al separar el vapor del líquido no evaporado, se evita cualquier posible daño o disminución en el rendimiento ocasionado por la entrada de líquido en el compresor.

Desde la perspectiva de la programación con IPSEpro, el uso del calderín en una bomba de calor elimina la necesidad de introducir el título de vapor en el evaporador y el condensador como datos de entrada. IPSEpro es capaz de simular de manera precisa y realista el comportamiento de la bomba de calor al considerar la presencia y el funcionamiento del calderín en el sistema. Esto simplifica el proceso de modelado y programación, ya que no es necesario proporcionar información adicional relacionada con el título de vapor, lo cual facilita el desarrollo e implementación del modelo en IPSEpro.

Comentado [MS22]: Empiezas este apartado hablando de la operación y el modelado a carga parcial, pero ahora pasas a describir el calderín. ¿Tiene sentido o debería incluirse esta descripción en otra parte? Al menos, debería incluirse una explicación de por qué se incluye en este apartado.

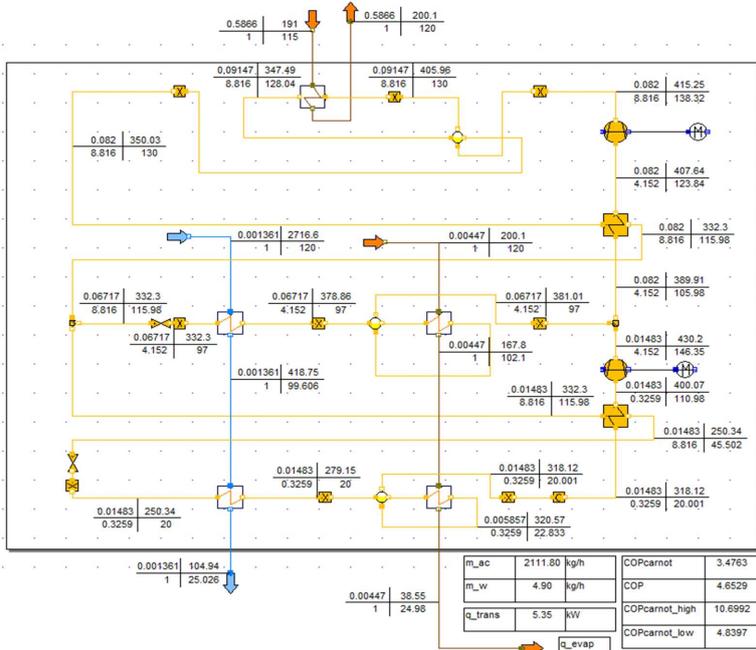


Ilustración 23. Ciclo Final de Bomba de Calor a Carga Parcial

- Ciclo orgánico de Rankine

La modelación de un ciclo orgánico de Rankine, que consta de un evaporador con calderín, dos condensadores con calderín, dos turbinas y dos válvulas, puede abordarse desde dos perspectivas distintas: condiciones de diseño y condiciones de carga parcial. Cada enfoque tiene sus propias características y consideraciones específicas, ya que se deben tener en cuenta diferentes variables y parámetros para lograr un funcionamiento óptimo del ciclo en cada caso.

En condiciones de diseño, el objetivo principal es determinar los parámetros y configuraciones óptimas del ciclo orgánico de Rankine para lograr una eficiencia máxima. En esta etapa, se definen y fijan las condiciones ideales de operación, como la carga térmica total, las temperaturas de entrada y salida de los fluidos de trabajo, y los flujos de trabajo estables. Además, se seleccionan los componentes adecuados, como el evaporador, los condensadores, las turbinas y las válvulas, para asegurar un rendimiento óptimo del ciclo.

La modelación en condiciones de diseño implica el uso de ecuaciones termodinámicas y modelos matemáticos para determinar los coeficientes de transferencia de calor, las presiones y temperaturas en los diferentes componentes, la eficiencia de las turbinas y las válvulas, y otros parámetros clave. También se deben considerar las propiedades termodinámicas de los fluidos de trabajo orgánicos utilizados en el ciclo.

En contraste, la modelación a carga parcial del ciclo orgánico de Rankine implica simular su comportamiento bajo condiciones variables de operación. En esta situación, la carga térmica puede fluctuar y las temperaturas de entrada y salida de los fluidos pueden variar en función de la demanda térmica real. Esto implica una mayor complejidad en el modelo, ya que se deben tener en cuenta los cambios en las condiciones de operación y adaptar el funcionamiento del ciclo en consecuencia.

La modelación a carga parcial requiere de estrategias de control avanzadas para optimizar la eficiencia energética del ciclo. Estas estrategias pueden incluir el ajuste de las velocidades de las turbinas, la apertura de las válvulas y la capacidad de los intercambiadores de calor en función de la carga térmica variable. Se utilizan algoritmos de control para maximizar la eficiencia y minimizar el consumo de recursos durante el funcionamiento a carga parcial.

Además, en la modelación a carga parcial, se deben considerar los efectos de las pérdidas de calor y de presión en los diferentes componentes del ciclo. Estas pérdidas pueden ser significativas bajo condiciones de carga parcial y deben ser tenidas en cuenta para obtener resultados precisos y realistas.

El calderín desempeña un papel crucial al separar el vapor de trabajo del líquido de trabajo, lo que permite un intercambio de calor más eficiente y un rendimiento óptimo del ciclo.

El calderín se ubica entre el evaporador y la turbina y también entre la turbina y el condensador. Su función principal es recibir el flujo de vapor saturado proveniente del evaporador y separar el vapor del líquido no evaporado, lo que garantiza que solo el vapor se dirija a la turbina. Esto es esencial para asegurar un rendimiento adecuado de la turbina y evitar que el líquido no evaporado ingrese a la turbina, lo cual podría causar daños y afectar el rendimiento general del ciclo.

En el calderín, el vapor y el líquido se separan por diferencia de densidad. El vapor, al ser más liviano, tiende a ascender y se recoge en la parte superior del calderín, mientras que el líquido más pesado se acumula en la parte inferior. Esta separación es facilitada por la geometría del calderín, que permite que el vapor se desplace hacia la turbina y el líquido se retire por una salida independiente.

El uso del calderín en el ciclo orgánico de Rankine tiene varias ventajas. En primer lugar, permite que el vapor se dirija a la turbina con un alto grado de calidad, lo que maximiza la eficiencia de la turbina y, por lo tanto, la producción de trabajo. Además, al separar el vapor del líquido no evaporado, se evita cualquier posible daño o disminución en el rendimiento causado por la entrada de líquido en la turbina.

Desde la perspectiva de la programación con IPSEpro, el uso del calderín en el ciclo orgánico de

Rankine elimina la necesidad de ingresar el título de vapor en el evaporador y el condensador como datos de entrada. IPSEpro es capaz de simular el comportamiento del ciclo de manera precisa y realista al considerar la presencia y el funcionamiento del calderín en el sistema. Esto simplifica el proceso de modelado y programación, ya que no es necesario proporcionar información adicional relacionada con el título de vapor, lo cual agiliza el desarrollo y la implementación del modelo en IPSEpro.

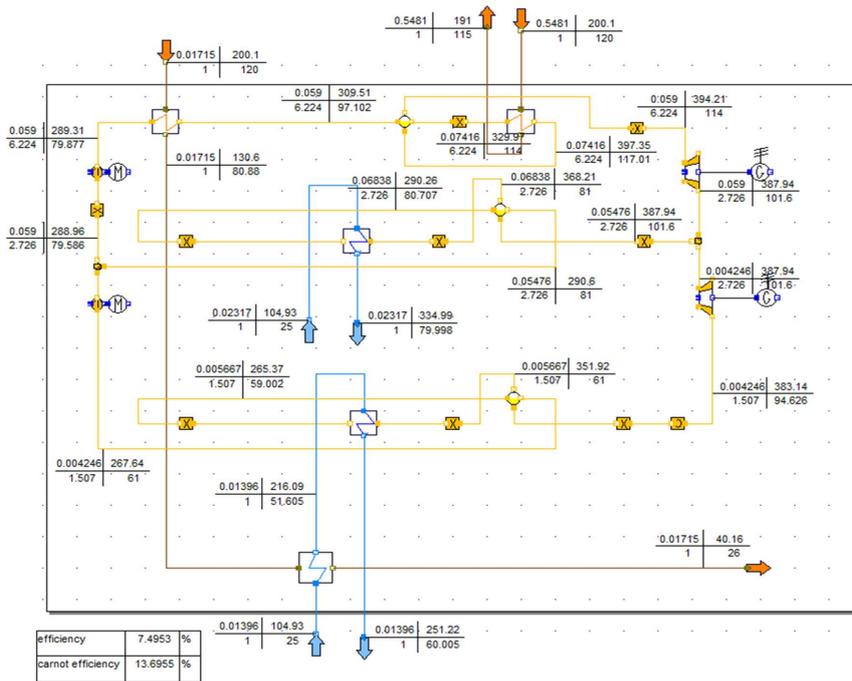


Ilustración 24. Ciclo Orgánico de Rankine Final a Carga Parcial

6 RESULTADOS

El proyecto realizado tiene como objetivo principal obtener resultados claros y confiables en dos aspectos fundamentales. El primero de ellos es la selección del fluido de trabajo más adecuado para ser utilizado como refrigerante orgánico en dos sistemas diferentes: la bomba de calor y el ciclo orgánico de Rankine. El segundo resultado esperado es la elección de los ciclos de bomba de calor y Rankine más eficientes.

6.1 Caso 1. Comparación de fluidos

En la etapa de selección del fluido de trabajo para la parte de la bomba de calor, se consideraron inicialmente nueve fluidos orgánicos distintos. Estos fluidos fueron seleccionados en base a su potencial para ser utilizados como refrigerantes y sus propiedades termodinámicas y químicas favorables. Se consideraron inicialmente nueve fluidos orgánicos distintos para la selección del fluido en la parte de la bomba de calor. Una vez se haya realizado el análisis, en el ciclo orgánico de Rankine se ensayará solo con los que mejores resultados den. Los fluidos son los siguientes:

- Amoníaco: El amoníaco (NH_3) es un fluido orgánico ampliamente utilizado en aplicaciones de refrigeración y bombas de calor. Tiene buenas propiedades de transferencia de calor y una alta capacidad de enfriamiento. Sin embargo, es tóxico y requiere precauciones adicionales en su manejo.
- Buteno: El buteno es un hidrocarburo con cuatro átomos de carbono y una doble ligadura. Se utiliza en algunos sistemas de refrigeración debido a su capacidad para transferir calor de manera eficiente. Sin embargo, tiene limitaciones en términos de estabilidad química y toxicidad.
- Isobuteno: El isobuteno es un hidrocarburo isomérico del buteno. Tiene propiedades similares al buteno en términos de capacidad de transferencia de calor. Sin embargo, al igual que el buteno, presenta limitaciones en términos de estabilidad química y toxicidad.
- Etanol: El etanol es un alcohol que se utiliza comúnmente como refrigerante en aplicaciones de baja temperatura. Tiene una capacidad de transferencia de calor moderada y es menos tóxico que algunos otros fluidos orgánicos. Sin embargo, su eficiencia puede verse afectada a altas temperaturas de evaporación.
- Tolueno: El tolueno es un hidrocarburo aromático utilizado en algunas aplicaciones de refrigeración y bombas de calor. Tiene una buena capacidad de transferencia de calor,

pero presenta problemas de estabilidad química y toxicidad.

- Isopentano: El isopentano es un hidrocarburo de cinco átomos de carbono utilizado en sistemas de refrigeración y bombas de calor. Tiene una alta capacidad de enfriamiento y buenas propiedades termodinámicas. Sin embargo, puede ser inflamable y requiere precauciones adicionales en su manejo.
- Pentano: El pentano es otro hidrocarburo utilizado en sistemas de refrigeración y bombas de calor. Tiene propiedades similares al isopentano en términos de capacidad de enfriamiento y propiedades termodinámicas. También puede ser inflamable y requiere precauciones en su uso.
- Ciclopentano: El ciclopentano es un hidrocarburo cíclico utilizado en algunos sistemas de refrigeración. Tiene una alta capacidad de transferencia de calor y buenas propiedades termodinámicas. Sin embargo, su inflamabilidad puede ser un desafío en términos de seguridad.
- Novec649: Es un fluido orgánico fluorado utilizado en aplicaciones de refrigeración y bombas de calor. Tiene una baja toxicidad y un bajo impacto ambiental. Además, presenta buenas propiedades de transferencia de calor y estabilidad química.

Según la tabla del reglamento de Seguridad para instalaciones frigoríficas donde se evalúa la seguridad y la determinación en función de la inflamabilidad y toxicidad del refrigerante usado, el único fluido analizado que se clasifica como A1, alta seguridad es el Novec-649.

	Baja Toxicidad	Alta Toxicidad
Sin propagación de llama	A1	B1
Baja inflamabilidad	A2L	B2L
Media Inflamabilidad	A2	B2
Alta Inflamabilidad	A3	B3

Incremento riesgo - toxicidad
→

Incremento riesgo - inflamabilidad
↓

Alta Seguridad, L1

Media Seguridad, L2

Baja Seguridad, L3

Tabla 1. Clasificación de refrigerantes según su inflamabilidad y toxicidad

Estos fluidos de trabajo fueron usados para el modelado del ciclo de bomba de calor base con y sin regenerador. En la siguiente tabla se exponen los coeficientes e rendimiento de cada fluido, su presión máxima y mínima, y los intercambiadores extras usados.

	COP	$p_{\text{máx}}$ (bar)	$p_{\text{mín}}$ (bar)	Equipo
Amoniaco	1,83	109	8,575	-
Buteno	1,45	30,58	2,546	-
Isobuteno	1,37	31,33	2,613	-
Etanol	2,46	5,734	0,059	-
Tolueno	2,28	1,705	0,029189	-
Isopentano	1,79	13,12	0,76665	sobre
Pentano	1,86	11,04	0,56558	sobre
Ciclopentano	2,13	7,992	0,346	-
Novec-649	2,61	8,817	0,32587	sobre+sub

Tabla 2. Comparación de fluidos en ciclo de bomba de calor

Es deseable evitar que la presión máxima en un ciclo de bomba de calor sea excesivamente alta por varias razones:

- Seguridad: Una presión extremadamente alta en el sistema aumenta el riesgo de fugas y rupturas en los componentes del sistema. Esto puede resultar en situaciones peligrosas, como explosiones o escapes de sustancias peligrosas. Por lo tanto, mantener una presión segura es fundamental para garantizar la integridad del sistema y la seguridad de las personas que trabajan con él.
- Costos y complejidad del sistema: Un sistema con una presión excesivamente alta requiere componentes y materiales más resistentes y costosos para soportar las altas presiones. Esto puede aumentar significativamente los costos de instalación y mantenimiento del sistema. Además, la presión alta también puede requerir un diseño y construcción más complejos del sistema, lo que dificulta su implementación y mantenimiento.
- Eficiencia del sistema: A medida que aumenta la presión del sistema, también aumenta la resistencia al flujo y se producen pérdidas de carga más significativas. Esto puede afectar negativamente la eficiencia del sistema, ya que se requiere una mayor cantidad de energía para superar la resistencia y mantener el flujo del fluido. Una presión moderada y adecuada permite minimizar las pérdidas de carga y maximizar la eficiencia del sistema.

La presión máxima recomendada para un ciclo de bomba de calor varía dependiendo del tipo de

refrigerante y del diseño específico del sistema. Sin embargo, como una guía general, se suele recomendar mantener la presión máxima dentro de un rango seguro y manejable, generalmente en el orden de 10 bar. Estos valores pueden variar según el refrigerante y el diseño del sistema, por lo que es importante consultar las recomendaciones y estándares específicos de la industria para cada caso en particular. Además, es crucial cumplir con las regulaciones y normativas de seguridad aplicables para garantizar un funcionamiento seguro del sistema de bomba de calor. Por lo tanto, el amoníaco, el buteno y el isobuteno quedan descartados automáticamente.

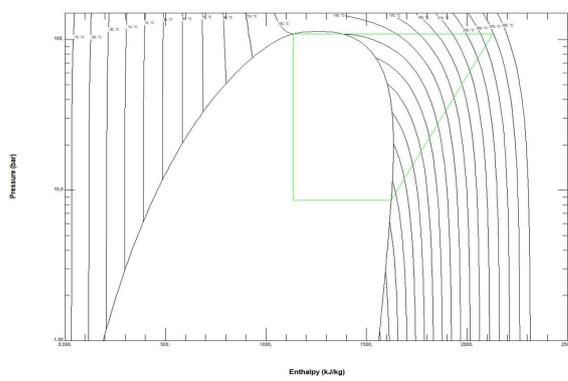


Ilustración 25. Campana de saturación y ciclo HP del amoníaco ($p_{min}: 8,6bar$; $p_{max}: 109 bar$)

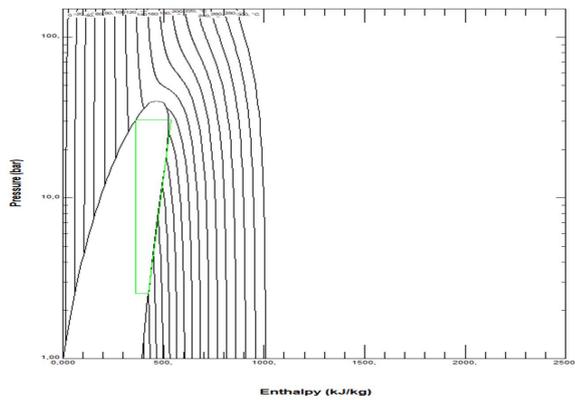


Ilustración 26. Campana de saturación y ciclo HP del buteno ($p_{min}: 2,5bar$; $p_{max}: 38,6 bar$)

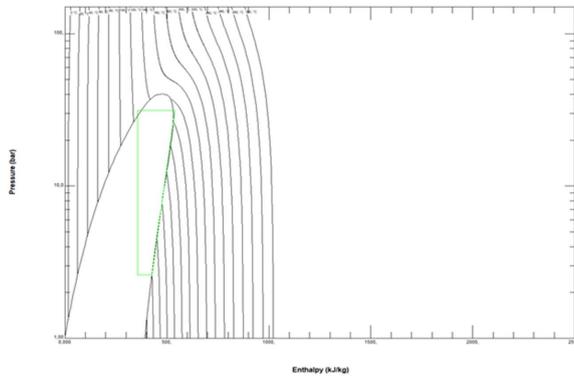


Ilustración 27. Campana de saturación y ciclo HP del isobuteno ($p_{min}: 2,61bar$; $p_{max}: 31,33 bar$).

Comentado [MS23]: Estas gráficas están muy bien, pero no se leen bien los valores de los ejes...se podría indicar en el título el valor de las presiones máxima y mínima.

Una presión mínima demasiado baja en un ciclo de bomba de calor también puede tener consecuencias negativas. Esto se debe a las siguientes razones:

- Rendimiento del sistema: Una presión mínima demasiado baja puede afectar el rendimiento del sistema de bomba de calor. Esto se debe a que la presión del sistema está directamente relacionada con la temperatura de evaporación del refrigerante. Si la presión es demasiado baja, la temperatura de evaporación también será baja, lo que resultará en un menor rendimiento térmico. Esto implica que el sistema requerirá más energía para lograr la misma transferencia de calor.
- Formación de burbujas y cavitación: Si la presión es demasiado baja en el sistema de bomba de calor, puede provocar la formación de burbujas de vapor en el fluido de trabajo. Estas burbujas pueden afectar el flujo de refrigerante y causar problemas de cavitación en los componentes de la bomba, como el compresor. La cavitación es el fenómeno en el cual se forman y colapsan burbujas de vapor en un líquido debido a cambios de presión. Esto puede provocar daños en los componentes y reducir la vida útil del sistema.
- Estabilidad del refrigerante: Algunos refrigerantes orgánicos pueden presentar problemas de estabilidad química a bajas presiones. Esto puede conducir a la descomposición o descomposición de los fluidos de trabajo, lo que afecta negativamente el rendimiento y la vida útil del sistema.

La presión mínima recomendada en un ciclo de bomba de calor también varía según el tipo de refrigerante y el diseño del sistema. Sin embargo, como referencia general, se suele recomendar

mantener la presión mínima por encima de un nivel seguro y adecuado. Por lo general, esto implica mantener una presión mínima en el rango de 0.5 a 10 bar para garantizar un rendimiento óptimo y evitar problemas como la cavitación y la descomposición del refrigerante. Es importante tener en cuenta que las recomendaciones específicas pueden variar según el refrigerante utilizado y las especificaciones del sistema. Por lo tanto, es fundamental consultar las recomendaciones del fabricante del equipo y cumplir con las regulaciones y normativas aplicables para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente del sistema de bomba de calor. Todo esto hace que prácticamente, el etanol y el tolueno queden descartados.

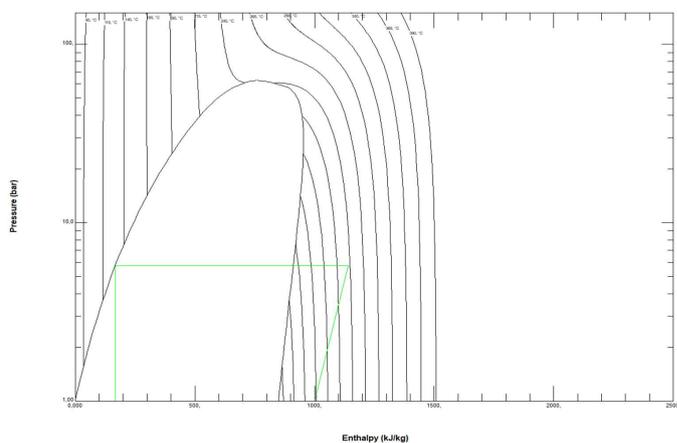


Ilustración 28. Campana de saturación y ciclo HP del etanol ($p_{min}: 0,059bar$; $p_{max}: 5,73bar$):-

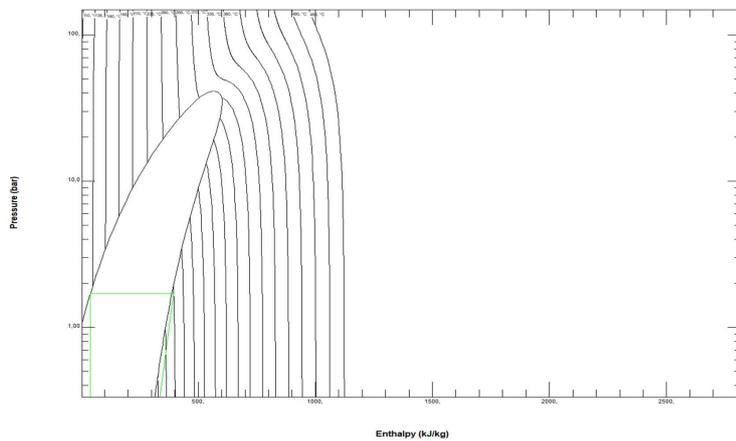


Ilustración 29. Campana de saturación y ciclo HP del tolueno (p_{\min} : 0,029 bar ; p_{\max} : 1,705 bar).

A continuación, se analiza el ciclo de bomba de calor con regeneración para los mismos fluidos, exceptuando los eliminados anteriormente. Se añade en una columna el título de vapor de entrada al evaporador. Esto se realiza ya que el modelado está optimizado según esta variable y las temperaturas de condensación y evaporación. Cuanto menos sea el título de vapor de entrada, más intercambio de calor latente existirá en el evaporador, por lo que el ciclo será más eficiente.

Se puede observar que la variación de COP entre los distintos refrigerantes es mínima por lo que el óptimo será el Novec-649, ya que es el menos tóxico e inflamable.

	COP	p_{\max} (bar)	p_{\min} (bar)	x(%)
Etanol	2,43	5,734	0,059	0,16
Tolueno	2,63	1,705	0,029189	0,15
Isopentano	2,53	13,12	0,76665	0,22
Pentano	2,55	11,04	0,56558	0,21
Ciclopentano	2,58	7,992	0,346	0,18
Novec-649	2,47	8,817	0,32587	0,3

Tabla 3. Comparación de fluidos para ciclo de bomba de calor con regenerador

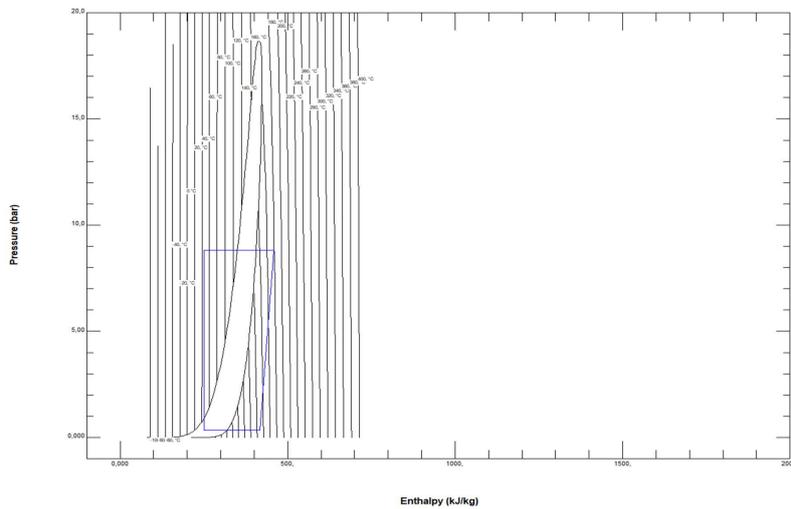


Ilustración 30. Campana de saturación y ciclo HP del novec-649 (p_{\min} : 0,33 bar ; p_{\max} : 8,82 bar).

Una vez analizados los distintos fluidos para la bomba de calor, es necesario comprobar su funcionamiento en el ciclo orgánico de Rankine para así, saber cuál será el mejor para ser usado en el sistema de almacenamiento global. Los resultados tras los ensayos se muestran en la siguiente tabla:

	Rendimiento(%)	Rend_Carnot(%)	p_{\max}	p_{\min}	Equipo
Ethanol	4,71	8,3	1,306	0,5822	sobre
Toluene	4,61	8,15	0,4606	0,2253	sobre+sub
Isopentane	4,5	8,15	5,154	3,127	sobre+sub
Pentane	4,5	8,15	4,168	2,472	sobre+sub
Cyclopentane	4,21	8,15	2,873	1,654	sobre+sub
Novec649	4,08	8,15	3,041	1,708	sobre+sub

Tabla 4. Comparación de fluidos para ciclo orgánico de Rankine

En dos de las columnas se muestran el rendimiento de Carnot y el rendimiento real del ciclo. Son dos conceptos importantes en el estudio de los ciclos de energía térmica.

El rendimiento de Carnot es un límite teórico máximo de eficiencia para cualquier ciclo de energía térmica que opera entre dos temperaturas: una temperatura de alta temperatura T_H y una temperatura de baja temperatura T_C . Este rendimiento se basa en la idea de un ciclo reversible que opera entre

estas dos temperaturas y utiliza un fluido de trabajo ideal. El rendimiento de Carnot se calcula utilizando la fórmula:

$$\eta_{Carnot} = 1 - \left(\frac{T_C}{T_H}\right)$$

Donde η_{Carnot} representa el rendimiento de Carnot.

El rendimiento real de un ciclo orgánico de Rankine se refiere al rendimiento observado en un sistema de generación de energía térmica que utiliza un ciclo de Rankine con un fluido de trabajo orgánico. Este rendimiento real tiene en cuenta las eficiencias de los diferentes componentes del ciclo, como la bomba, el evaporador, la turbina y el condensador. Este se ve afectado por varios factores, como las pérdidas de calor en los intercambiadores de calor, las irreversibilidades en los procesos de expansión y compresión, y las características específicas del fluido de trabajo orgánico utilizado. Se calcula utilizando la fórmula:

$$\eta_{real} = \left(\frac{W_{net}}{Q_H}\right)$$

Donde:

- η_{real} representa el rendimiento real del ciclo orgánico de Rankine.
- W_{net} es el trabajo neto producido por la turbina (en unidades de energía, como julios o kilovatios).
- Q_H es la cantidad de calor suministrada a la fuente de calor caliente (en unidades de energía, como julios o kilovatios).

En la tabla se aprecia que los rendimientos de los distintos fluidos orgánicos son muy similares por lo que el Novec-649 es el idóneo por sus propiedades.

[En los próximos gráficos, la línea roja representa la variación de temperatura del aceite térmico en el evaporador.-](#)

Comentado [MS24]: Hay un comentario anterior referente a este punto. Quizás en la leyenda de las figuras se puede incluir una aclaración muy breve

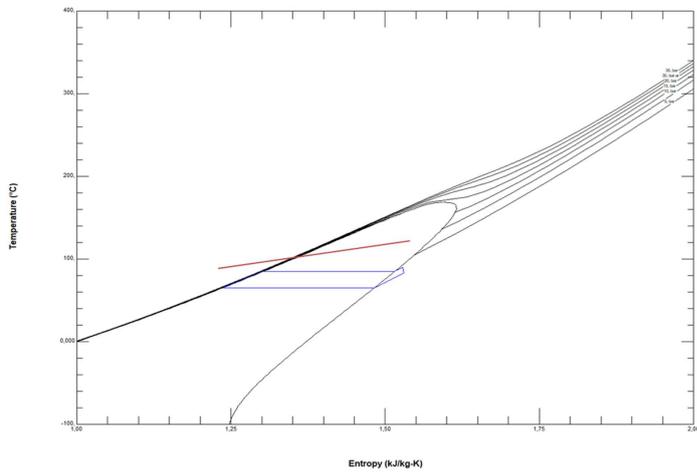


Ilustración 31. Campana de saturación y ORC del novec-649.

Comentado [MS25]: ¿Qué indica la línea roja?

Comentado [MS26R25]: Pendiente?

El que mejor rendimiento tiene es el etanol, pero su comportamiento en el ciclo de bomba de calor, al tener una presión mínima tan baja hace que no sea el seleccionado.

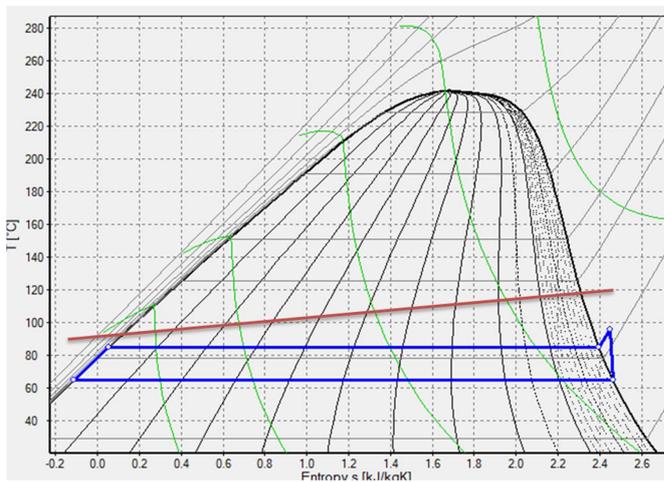


Ilustración 32. Campana de saturación y ORC del etanol.

6.2 Caso 2. Almacenamiento

En este apartado se comentará la selección del modelo final del ciclo de bomba de calor y del ciclo orgánico de Rankine. En ambos ciclos se hace una comparación del rendimiento de cada uno, desde el modelo más simple, al más complejo. Será elegido como modelo final el que sea más eficiente y el que sea capaz de disminuir los residuos ~~residuales~~ como el aceite sobrante del reactor termoquímico, aprovechando su carga energética.

Comentado [MS27]: Redundante

- Bomba de calor

En este caso se comparan 7 ciclos distintos: el simple sin y con regenerador, con evaporador intermedio simple, con regenerador en la parte de alta temperatura, en la parte de baja temperatura, en ambas partes y mixto.

Los cuatro primeros quedan automáticamente descartados ya que la temperatura de salida del agua no puede bajar de 50 grados. Esto ocurre ya que la temperatura de evaporización de esos ciclos para que la válvula lleve al refrigerante a las condiciones de entrada del evaporador a entalpía constante, no puede ser menor de 45 grados, ya que, en caso contrario, el punto se saldría de la campana de saturación. Se desechan estos modelos ya que no se aprovecha todo el calor que aporta el agua, pudiendo intercambiar calor hasta que esta llegue a 25 grados. Esto nos deja con 3 ciclos de bomba de calor posibles para ensayar.

	Evaporador intermedio y regenerador en baja presión	Evaporador intermedio y dos regeneradores	Evaporador intermedio y regenerador mixto
COP	3.15	4.3	2.41

Tabla 5. Comparación del COP entre distintos ciclos de bomba de calor

Se selecciona al modelo con dos regeneradores ya que es el que tiene un ~~coeficiente de~~ rendimiento más elevado. Este es el ciclo al que se le aplica el aprovechamiento de la corriente de aceite residual del reactor termoquímico. Esto ~~se~~ efectúa ~~de la siguiente manera~~ según se [indica en la figura.](#)

Comentado [MS28]: Según se indica en la figura...

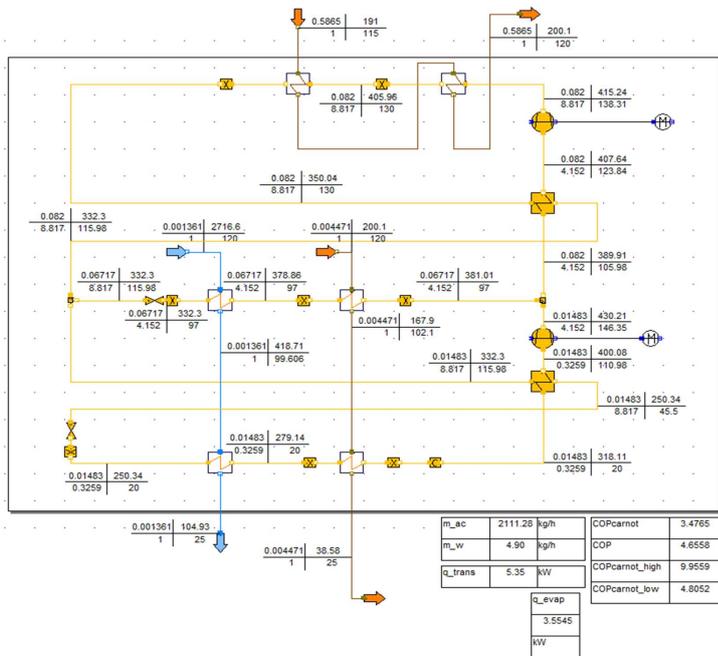


Ilustración 33. Ciclo de Bomba de Calor final

Se aprecia que el coeficiente de rendimiento aumenta al añadir la corriente de aceite y transferir su calor al refrigerante a la salida de ambos evaporadores, el intermedio y el principal.

- Ciclo orgánico de Rankine

En este caso, se analizan 4 modelos con el fin de aprovechar al máximo el aceite residual del reactor, y producir agua a dos temperaturas distintas, mediante el uso de dos condensadores. El desarrollo del ciclo final implica la implementación de tres modelos previos que preparan las condiciones adecuadas para su funcionamiento óptimo. Cabe destacar que el ciclo final ya había sido previamente determinado.

Con el objetivo de maximizar la utilización del aceite residual del reactor termoquímico, se ha identificado que el enfoque más beneficioso es precalentar el fluido orgánico antes de su introducción al evaporador. Asimismo, se propone precalentar el agua que ingresa a los condensadores. Estas medidas contribuyen a mejorar la eficiencia energética del ciclo y optimizar el aprovechamiento de los recursos.

El resultado final de este proceso de optimización será la obtención del modelo representado en la **Figura 3**. Este modelo incorpora los pasos previos mencionados y permite obtener el máximo provecho del aceite residual y la energía involucrada en el ciclo del reactor termoquímico. Tiene una eficiencia de 7.5 y una eficiencia de Carnot de 13.7.

Con formato: Resaltar

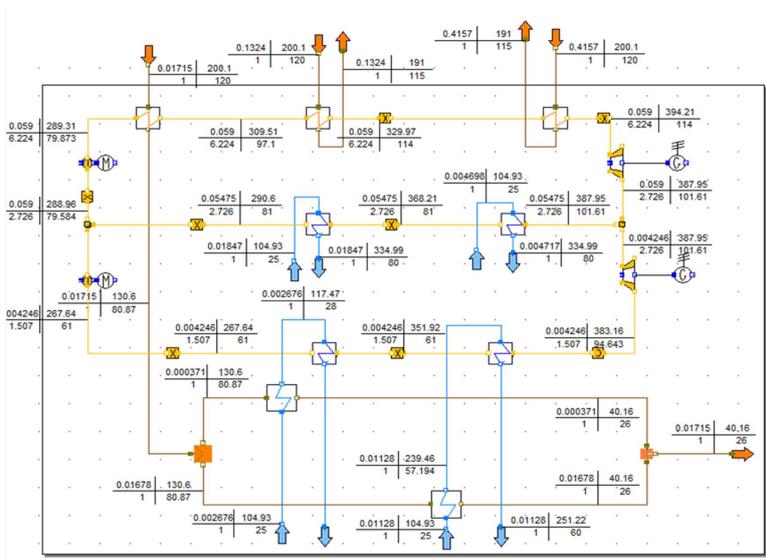


Ilustración 34. Ciclo Orgánico de Rankine final

7 CONCLUSIONES.

Después de varios meses de dedicación a este proyecto, se han obtenido diversas conclusiones que resultan relevantes para abordar el problema de la intermitencia de las energías renovables. En primer lugar, se ha constatado que existen soluciones cada vez más eficientes para enfrentar este desafío, lo cual brinda perspectivas prometedoras en la búsqueda de una mayor estabilidad en la generación de energía renovable.

El enfoque desarrollado en este proyecto se centra en la implementación de un sistema "power to heat to power" (P2H2P) que utiliza un almacenamiento termoquímico. Esta opción ha demostrado ser viable y eficiente para solucionar el problema de la intermitencia. Además, destaca por la generación de pocos residuos, lo que implica un impacto ambiental reducido. Esta conclusión se basa en el análisis exhaustivo de los resultados obtenidos y en la evaluación de otras posibles alternativas.

Otra conclusión importante del proyecto se refiere a la identificación del fluido orgánico óptimo para actuar como caloportador. Se ha determinado que el Novec469 es el más adecuado en términos de seguridad y eficacia, a pesar de no ser el que posee el coeficiente de rendimiento más alto ni la mayor eficiencia térmica. La elección de este fluido se debe a su naturaleza no tóxica e incombustible, lo que garantiza una operación segura del sistema. Además, ~~los ratios~~ las ratios de rendimiento varían de manera insignificante entre diferentes fluidos caloportadores, lo que indica que, incluso si hubiera otros con un rendimiento ligeramente superior, los costos adicionales asociados a la seguridad y el mantenimiento podrían superar los beneficios.

Además de las conclusiones previas, es relevante resaltar que el sector de almacenamiento de energías renovables todavía requiere una amplia investigación y desarrollo. Sin embargo, se observa una creciente asignación de recursos en esta área debido a la importancia de la transición energética en la actualidad. El hecho de que se destinen cada vez más recursos a la investigación en almacenamiento de energía renovable indica el reconocimiento de su papel fundamental en la integración de fuentes de energía sostenibles en la matriz energética.

En el contexto específico de este proyecto, se considera que la solución propuesta es viable hasta donde se ha investigado. No obstante, es importante destacar que aún queda un amplio margen de desarrollo antes de que pueda ser implementada a gran escala. En particular, la parte del reactor termoquímico requiere una investigación adicional para determinar la reacción termoquímica más eficiente que pueda operar en las temperaturas requeridas por el proceso. Este aspecto específico no ha sido abordado en profundidad dentro del alcance de este proyecto y representa una oportunidad para futuras investigaciones.

En conclusión, si bien se considera que el proyecto es viable en el estado actual de la investigación, es necesario reconocer que se requiere un trabajo adicional para su implementación práctica. La investigación en almacenamiento de energías renovables continúa evolucionando, y se espera que los avances en este campo contribuyan significativamente a la transición hacia un sistema energético más sostenible.

8 REFERENCIAS.

1. . Jouhara, H., Żabnieńska-Góra, A., Khordehghah, N., Ahmad, D., & Lipinski, T. (2020). Latent thermal energy storage technologies and applications: A review. *International Journal of Thermofluids*, 5–6. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2020.100039>
2. Agencia Europea de Medio Ambiente. (2019). El medio ambiente en Europa. *El Medio Ambiente En Europa Estado y Perspectivas 2020*. <https://doi.org/10.2800/833735>
3. Aneke, M., & Wang, M. (2016). Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review. In *Applied Energy* (Vol. 179). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.097>
4. Aydin, D., Casey, S. P., & Riffat, S. (2015). The latest advancements on thermochemical heat storage systems. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 41, pp. 356–367). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.054>
5. Burian, O., & Skoda, R. (2020). Design and optimization of non-supercritical co2 thermal power cycle for “P2H2P” energy storage system. *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, 5. <https://doi.org/10.1115/GT2020-16027>
6. Chen, X., Zhang, Z., Qi, C., Ling, X., & Peng, H. (2018). State of the art on the high-temperature thermochemical energy storage systems. In *Energy Conversion and Management* (Vol. 177, pp. 792–815). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.10.011>
7. Consejo Europeo. (2021). *El Consejo adopta la Ley Europea del Clima - Consilium*. <https://www.consilium.europa.eu/es/press/press-releases/2021/06/28/council-adopts-european-climate-law/>
8. Criado, Y. A., Alonso, M., Abanades, J. C., & Anxionnaz-Minvielle, Z. (2014). Conceptual process design of a CaO/Ca(OH)₂ thermochemical energy storage system using fluidized bed reactors. *Applied Thermal Engineering*, 73(1), 1087–1094. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.08.065>
9. de Prensa, G., de San, P., De, J., & Cruz, L. A. (2021). *VICEPRESIDENCIA CUARTA DEL GOBIERNO DE ESPAÑA MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO Consejo de Ministros*. www.miteco.gob.es
10. Dormido, L., Garrido, I., L’Hotellerie-Fallois, P., & Santillán, J. (2022). El cambio climático y la sostenibilidad del crecimiento: iniciativas internacionales y políticas europeas. *Documentos Ocasionales N° 2213*.

Con formato: Inglés (Estados Unidos)

11. El cambio climático | US EPA. (2022, 3 agosto). US EPA. <https://espanol.epa.gov/el-cambio-climatico>
12. Eppinger, B., Steger, D., Regensburger, C., Karl, J., Schlücker, E., & Will, S. (2021). Carnot battery: Simulation and design of a reversible heat pump-organic Rankine cycle pilot plant. *Applied Energy*, 288. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116650>
13. Estado, J. del. (2018). Real Decreto-ley 15/2018, de 5 de octubre, de medidas urgentes para la transición energética y la protección de los consumidores. *Boletín Oficial Del Estado*.
14. European Environment Agency (2022). ¿Qué está dañando la naturaleza europea?. <https://www.eea.europa.eu/es/senales/senales-2021/articulos/que-esta-danando-la-naturaleza-europea>
15. European Environment Agency. (2016). Acerca del cambio climático. <https://www.eea.europa.eu/es/themes/climate/about-climate-change>
16. European Environment Agency. (2020, November). *EU Biodiversity strategy*. European Environment Agency. <https://biodiversity.europa.eu/countries/spain/eu-biodiversity-strategy>
17. European Environment Agency. (s. f.). Aspectos destacados por la AEMA sobre el medio ambiente europeo. <https://www.eea.europa.eu/es/highlights>
18. Farulla, G. A., Cellura, M., Guarino, F., & Ferraro, M. (2020). A review of thermochemical energy storage systems for power grid support. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 10, Issue 9). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/app10093142>
19. Han, X., Wang, L., Ling, H., Ge, Z., Lin, X., Dai, X., & Chen, H. (2022). Critical review of thermochemical energy storage systems based on cobalt, manganese, and copper oxides. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 158). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112076>
20. Ignacio Pérez Cicala Tutor Domingo Santana Santana, F. (2017). *Modelización de ciclos Rankine mediante el método de Spencer, Coon y Cannon*. <https://es.mathworks.com/matlabcentral/leexchange/64359-modelling-of-rankine->
21. International Energy Agency. (2018). Energy storage. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/energy-storage>
22. Kazak, T. (2022). European Green Deal. *Yearbook of the Law Department*, 9(10). <https://doi.org/10.33919/yldnbu.20.9.12>
23. Kougias, I., Taylor, N., Kakoulaki, G., & Jäger-Waldau, A. (2021). The role of photovoltaics for the European Green Deal and the recovery plan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111017>

Con formato: Inglés (Estados Unidos)

Código de campo cambiado

Con formato: Inglés (Estados Unidos)

Con formato: Inglés (Estados Unidos)

24. la Moncloa. (2020). *Declarada la emergencia climática* . La Moncloa.
25. La nueva clasificación facilita el uso del R32 un refrigerante con ventajas ambientales. (2018.). https://aircon.panasonic.eu/ES_es/blog/la-nueva-clasificaci%C3%B3n-facilita-el-uso-del-r32-un-refrigerante-con-ventajas-ambientales/
26. La transición energética podría generar 24 millones de empleos para 2030, según la OIT. (2018). *Europa Press* . <https://www.europapress.es/sociedad/medio-ambiente-00647/noticia-transicion-energetica-podria-generar-24-millones-empleos-2030-oit-20180514220035.html>
27. Lanchi, M., Turchetti, L., Sau, S., Liberatore, R., Cerbelli, S., Murmura, M. A., & Annesini, M. C. (2020). A discussion of possible approaches to the integration of thermochemical storage systems in concentrating solar power plants. *Energies*, 13(18). <https://doi.org/10.3390/en13184940>
28. López Antoranz, J. (2022). El hidrógeno verde en la Unión Europea: una vía necesaria para la transición energética. *Revista Española de Desarrollo y Cooperación*, 48. <https://doi.org/10.5209/redc.81174>
29. Lovegrove, K., & Stein, W. (2012). *Concentrating solar power technology: principles, developments and applications* (K. Lovegrove & W. Stein, Eds.) [Book]. Woodhead Publishing.
30. Ma, R., Qiao, H., Yu, X., Yang, B., & Yang, H. (2023). Thermo-economic analysis and multi-objective optimization of a reversible heat pump-organic Rankine cycle power system for energy storage. *Applied Thermal Engineering*, 220. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119658>
31. Marqués, J., & Saenz de Ormijana, T. (2019). La descarbonización de la industria, retos y oportunidades. *Papeles de Economía Española*, 163.
32. Ministerio de Agricultura, A. y M. A. (Fundación B. O. E. de C. C. A. E. de M. C. N. de E. A. (2014). *GUÍA RESUMIDA DEL QUINTO INFORME DE EVALUACIÓN DEL IPCC GRUPO DE TRABAJO II*.
33. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico Español. (2021). *PLAN NACIONAL INTEGRADO DE ENERGÍA Y CLIMA*.
34. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2021). *El Gobierno aprueba la Estrategia de Almacenamiento Energético, clave para garantizar la seguridad del suministro y precios más bajos de la energía*. <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/el-gobierno-aprueba-la-estrategia-de-almacenamiento-energ%C3%A9tico-clave-para-garantizar-la-seguridad-del-suministro-y-precios-m%C3%A1s-bajos-de-la-energ%C3%A9tica/tcm:30-522653>

Con formato: Inglés (Estados Unidos)

Con formato: Inglés (Estados Unidos)

35. MITECO. (2020). Estrategia De Descarbonizacion a Largo Plazo 2050. *Miteco*.

36. Olivier, D., & Swc, J. (2015). *PERFORMANCE COMPARISON OF TWO TYPES OF TECHNOLOGIES ASSOCIATED WITH A POSITIVE ENERGY BUILDING: A REVERSIBLE HEAT PUMP/ORC UNIT AND A HEAT PUMP COUPLED WITH PV PANELS*.

Con formato: Inglés (Estados Unidos)

37. Ommen, T., Markussen, W. B., & Elmegaard, B. (2014). Heat pumps in combined heat and power systems. *Energy*, 76, 989–1000. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2014.09.016>

38. Organización Mundial de la Salud. (2021, October 30). *Cambio climático y salud*. Organización Mundial de La Salud (OMS). <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health>

39. Pachauri, R. K., Meyer, L., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Jiang, K., Jiménez Cisneros México, B., Kattsov, V., Lee, H., Minx, J., Mulugetta, Y., Brinkman, S., van Kesteren, L., Leprince-Ringuet, N., & van Boxmeer, F. (2014). *Cambio climático 2014 Equipo principal de redacción Equipo principal de redacción Unidad de apoyo técnico para el Informe de síntesis* (Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático, Ed.; IPCC). <http://www.ipcc.ch>.

40. Pacto, E., & Europeo, V. (2019). *COMUNICACIÓN DE LA COMISIÓN AL PARLAMENTO EUROPEO, AL CONSEJO EUROPEO, AL CONSEJO, AL COMITÉ ECONÓMICO Y SOCIAL EUROPEO Y AL COMITÉ DE LAS REGIONES*. <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>

41. Parlamento Europeo. (2023). *Textos aprobados - Eficiencia energética de los edificios (refundición) - Martes 14 de marzo de 2023*. https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2023-0068_ES.html#title1

42. PNUMA, & OMM. (2021). *Bases físicas Resumen para responsables de políticas*.

43. Quoilin, S., Dumont, O., & Lemort, V. (n.d.). *DESIGN, MODELING AND PERFORMANCE OPTIMISATION OF A REVERSIBLE HP-ORC PROTOTYPE*. <http://www.labothap.ulg.ac.be>

Con formato: Inglés (Estados Unidos)

44. Samper, J. A., Schockling, A., & Islar, M. (2021). Climate politics in green deals: Exposing the political frontiers of the european green deal. *Politics and Governance*, 9(2). <https://doi.org/10.17645/pag.v9i2.3853>

45. Sanhueza, E. (2011). ENERGÍA RENOVABLE PARA 2050: MÚLTIPLES DESAFÍOS. *INTERCIENCIA*, 36(10).

46. Santamouris, M., & Vasilakopoulou, K. (2021). Present and Future Energy Consumption of Buildings: Challenges and Opportunities towards Decarbonisation. *E-Prime*, 100002. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2021.100002>

Con formato: Inglés (Estados Unidos)

47. Schillings, C., Gils, H. V., & Fraga, E. S. (2017). Energy storage systems for advanced power applications. Springer.

Con formato: Inglés (Estados Unidos)

48. Steger, D., Karl, J., & Schlücker, E. (n.d.). LAUNCH AND FIRST EXPERIMENTAL RESULTS OF A REVERSIBLE HEAT PUMP-ORC PILOT PLANT AS CARNOT BATTERY. In *6th International Seminar on ORC Power Systems*.

Con formato: Inglés (Estados Unidos)

49. Textos aprobados - Eficiencia energética de los edificios (refundición). (2023). © Unión Europea, 2023 - Fuente: Parlamento Europeo.
https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2023-0068_ES.html#title1

50. Trahey, L., Brushett, F. R., Balsara, N. P., Ceder, G., Cheng, L., Chiang, Y. M., Hahn, N. T., Ingram, B. J., Minter, S. D., Moore, J. S., Mueller, K. T., Nazar, L. F., Persson, K. A., Siegel, D. J., Xu, K., Zavadil, K. R., Srinivasan, V., & Crabtree, G. W. (2020). Energy storage emerging: A perspective from the Joint Center for Energy Storage Research. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(23). <https://doi.org/10.1073/pnas.1821672117>

Con formato: Inglés (Estados Unidos)

51. United Nations Environment Programme. (2019). *The emissions gap report 2019*.

52. United Nations. (2020). ¿Qué es el cambio climático? | Naciones Unidas.
<https://www.un.org/es/climatechange/what-is-climate-change>

53. Variş, Ç., & Özçira Özkiliç, S. (2023). In a biogas power plant from waste heat power generation system using Organic Rankine Cycle and multi-criteria optimization. *Case Studies in Thermal Engineering*, 102729. <https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2023.102729>

Con formato: Inglés (Estados Unidos)

54. World Health Organization: WHO. (2021). Cambio climático y salud. [www.who.int. https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health)

Código de campo cambiado

55. Yan, J., Zhao, C. Y., Xia, B. Q., & Wang, T. (2019). The effect of dehydration temperatures on the performance of the CaO/Ca(OH)₂ thermochemical heat storage system. *Energy*, 186. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.167>

Con formato: Inglés (Estados Unidos)