

E.T.S. de Ingeniería Industrial, Informática
y de Telecomunicación

Estudio y caracterización del ciclo orgánico Rankine en plantas termosolares con receptor de torre



Máster Universitario
en Ingeniería Industrial

Trabajo Fin de Máster

Autor: Daniel Alonso Martínez

Director: David Astrain Ulibarrena

Codirector: Pablo Sanchis Gurpide

Pamplona, Septiembre de 2020

upna

Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

Agradecimientos:

En primer lugar, agradecer a mi familia por haber hecho posible llegar hasta la realización de este trabajo fin master. También agradecer los apoyos recibidos, sin los cuales todo esto no hubiera sido posible y a mis amigos por los ánimos recibidos.

De igual manera, quiero agradecer a la empresa Cener por haberme dado la posibilidad de llevar a cabo la realización de mi trabajo final de master en su empresa. También a agradecer a mi tutor en la empresa Fritz Zaversky por la ayuda recibida.

Resumen:

En el presente trabajo fin de estudios se abordará una novedosa forma de trabajar en plantas termosolares de torre. Teniendo en cuenta las innovaciones y características intrínsecas de los receptores solares en las plantas termosolares de torre, cabe la posibilidad de trabajar con ciclos Brayton y ciclos combinados. Desde el punto de vista tecnoeconómico, el ciclo combinado es viable para plantas pequeñas operando en zonas aisladas.

En plantas de pequeña escala, en las que el ciclo Rankine ronda el MW de potencia, es más viable utilizar ciclos ORC en vez de ciclo Rankine con agua. En el presente estudio se valorarán distintos fluidos orgánicos como fluidos trabajo. También se estudiarán distintas formas de operación de los ciclos para acabar llevando a cabo una caracterización de los ciclos ORC.

Palabras clave:

Ciclo orgánico Rankine, Ciclos combinados, Plantas termosolares, Receptor de torre

Summary:

In this final study, a new way of working in solar thermal tower plants will be addressed. Taking into account the innovations and intrinsic characteristics of the solar receivers in the tower thermosolar plants, it is possible to work with Brayton cycles and combined cycles. From a techno-economic point of view, the combined cycle is viable for small plants operating in isolated areas.

In small-scale plants, where the Rankine cycle is around the MW of power, it is more viable to use ORC cycles instead of Rankine cycles with water. In this study, different organic fluids will be assessed as working fluids. Different ways of operating the cycles will also be studied in order to finally carry out a characterisation of the ORC cycles.

Keywords:

Organic Rankine cycle, Combined cycle, Solar thermal plants, Tower receiver

ÍNDICE

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	10
ÍNDICE DE GRÁFICAS	11
ÍNDICE DE TABLAS	11
ÍNDICE DE ECUACIONES	11
NOMENCLATURA	11
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	12
1.1. Motivación.....	12
1.2. Aplicación.....	12
1.3. Objetivos.....	13
2. ESTADO DEL ARTE	14
2.1. Introducción sobre las necesidades de explotar las energías renovables:.....	14
2.2. Introducción sobre la producción de energía solar termoeléctrica.....	15
2.2.1. <i>Funcionamiento de las plantas de concentración solar (Concentrated Solar Power, CSP)</i>	15
2.2.2. <i>Tipos de plantas de concentración solar en función del tipo de concentrador y sus características</i>	16
2.3. Plantas CSP con receptor central de torre.....	17
2.3.1. <i>Características y componentes</i>	17
2.3.2. <i>Ciclos termodinámicos en plantas CSP con receptor central</i>	19
2.3.3. <i>Modelado de una planta CSP con receptor central</i>	24
2.3.4. <i>Plantas CSP instaladas a nivel nacional e internacional</i>	26
2.3.5. <i>Tipos de operación de las plantas termosolares</i>	26
2.4. Introducción tecno-económica.....	27
3. CICLOS ORGÁNICOS RANKINE	28
3.1. Introducción sobre los ciclos ORC.....	28
3.2. Fluidos orgánicos como fluido de trabajo y sus características.....	28
3.2.1. <i>Distinción entre Fluido seco, isoentrópico, fluido húmedo</i>	29
3.2.2. <i>Diferentes formas de trabajar con fluidos orgánicos</i>	29
3.2.3. <i>Temperatura crítica y máxima de trabajo</i>	30
3.2.4. <i>Temperatura y presión en evaporador y condensador</i>	32
3.2.5. <i>Subcategorías de los fluidos orgánicos:</i>	32
3.3. Elección del fluido orgánico de trabajo.....	34
3.3.1. <i>Posibles fluidos a elegir:</i>	34
3.3.2. <i>Características del ciclo ORC utilizado y fluido ideal</i>	35
3.3.3. <i>Conclusión sobre los fluidos a estudiar</i>	35
3.4. Modelado del ciclo ORC.....	36
3.4.1. <i>Programa IPSEpro</i>	36
3.4.2. <i>Modelado del ciclo ORC simple</i>	37
3.4.3. <i>Modelado del ciclo ORC regenerativo</i>	39
3.5. Ensayos, resultados sobre los ciclos ORC.....	40
3.5.1. <i>Ensayos del ciclo ORC</i>	40
3.5.2. <i>Resultados obtenidos</i>	41
4. CONCLUSIONES	47
4.1. Conclusiones generales.....	47

4.2. Elección del fluido de trabajo.....	47
5. BIBLIOGRAFÍA.....	49

Índice de ilustraciones

Ilustración 1 Brayton con receptor volumétrico abierto y acumuladores de calor regenerativos [4]	13
Ilustración 2 Distribución porcentual de la generación de electricidad en el mundo, por fuente de energía.....	15
Ilustración 3 Tipos de plantas de concentración solar.....	17
Ilustración 4 Receptores solares no volumétricos	18
Ilustración 5 Receptor volumétrico presurizado (Izquierda) y Receptor volumétrico atmosférico (Derecha).....	18
Ilustración 6 Instalación general del ciclo Rankine y Diagrama T-s.....	19
Ilustración 7 Ciclo Orgánico Rankine.....	20
Ilustración 8 Ciclo Kalina y Diagrama T-s.....	21
Ilustración 9 Esquema de la instalación de un ciclo Brayton abierto (izquierda) y cerrado (derecha)	21
Ilustración 11 Diagrama T-s ciclo Brayton.....	22
Ilustración 11 Esquema del ciclo combinado	23
Ilustración 12 Rendimiento de Carnot	23
Ilustración 13 Diagrama de un ciclo combinado	24
Ilustración 14 - Diagrama T-s; a (fluido isoentrópico), b (fluido húmedo), c (fluido seco)	29
Ilustración 15 Diagrama T-s ; Subcrítico sin recalentamiento, Subcrítico con recalentamiento, Transcrito [20]	30
Ilustración 16 Métodos para hallar la presión y temperatura crítica	31
Ilustración 17 Presiones y temperatura críticas para distintos fluidos orgánicos	31
Ilustración 18 temperaturas y presiones máximas y mínimas del ciclo para distintos fluidos... ..	32
Ilustración 19 diagrama T-s del fluido orgánico 245fa	33
Ilustración 20 diagrama T-s del fluido orgánico MDM.....	33
Ilustración 21 diagrama T-s de los fluidos orgánico Tolueno (izquierda) y ciclohexano (derecha)	34
Ilustración 22 ciclo ORC simple	37
Ilustración 23 evaporador real	38
Ilustración 24 Condensador de agua.....	39
Ilustración 25 Comparación entre ciclo ORC simple y regenerativo [21]	39
Ilustración 26 ciclo ORC regenerativo con detalle del intercambiador	40
Ilustración 27 GWP y LCOE de distintos fluidos	48

Índice de gráficas

Gráfica 1 Ciclo ORC simple; Tolueno	41
Gráfica 2 Ciclo ORC regenerativo; Tolueno	42
Gráfica 3 Comparativa ciclo ORC simple y regenerativo; Tolueno.....	42
Gráfica 4 Ciclo ORC simple; Ciclohexano.....	43
Gráfica 5 Ciclo ORC regenerativo; Ciclohexano	43
Gráfica 6 Comparativa ciclo ORC simple y regenerativo; Ciclohexano	44
Gráfica 7 Comparativa entre ciclohexano y tolueno.....	¡Error! Marcador no definido.
Gráfica 8 Comparativa entre ciclohexano y tolueno.....	¡Error! Marcador no definido.

Índice de tablas

Tabla 1 Propiedades básicas de distintos fluidos.....	36
Tabla 2 Parámetros de los componentes del ciclo ORC.....	38
Tabla 3 Valores de presión de la salida de la turbina.....	41
Tabla 4 Valores de presión y temperatura a la salida a la entrada de la turbina	41

Índice de ecuaciones

Ecuación 1 Rendimiento del ciclo combinado en función de los ciclos individuales.....	24
Ecuación 2 Rendimiento Solar-Térmico	24
Ecuación 3 Eficiencia óptica el campo de heliostatos.....	25
Ecuación 4 Eficiencia Térmica del receptor.....	25
Ecuación 5 Rendimiento térmico-eléctrico.....	25
Ecuación 6 Rendimiento solar - eléctrico.....	25

Nomenclatura

CSP	Concentrated Solar Power
ORC	Organic rankine cycle
LCOE	Levelized Cost of Energy
GWP	Global warming potential
TIT	temperature intel turbine
HRVG	Heat Recovery Vapour Generator
PR	Preasure Ratio
C	Concentración solar
BR+ORCR	Brayton regenerativo + ciclo orgánico rankine regenerativo
BRR+ORCR	Brayton regenerativo con recalentamiento + ciclo orgánico rankine regenerativo
BRR+ORCR	Brayton regenerativo con recalentamiento e intercooler+ ciclo orgánico rankine regenerativo

1. Introducción y objetivos

A lo largo de este trabajo se van a estudiar novedosas formas de trabajar en plantas termosolares. Este estudio, surge debido a que las plantas termosolares aún tienen bastante capacidad de mejora, ya que es una tecnología relativamente novedosa.

En este trabajo se va a estudiar la posibilidad de incorporar un ciclo orgánico en una planta termosolar. En concreto todo lo realizado en este trabajo estará centrado en estudiar los ciclos ORC para poder hacerlo trabajar como ciclo de baja en un ciclo combinado.

1.1. Motivación

La motivación de este estudio viene de anteriores investigaciones [1]. En ella se estudia la viabilidad tecno – económica de incorporar un ciclo combinado en planta termosolares con receptor central de torre. Después de estudiar diversas configuraciones de campo solar y evaluar la opción de multi torre. Una de las conclusiones a las que llega el artículo, es que para potencias instaladas altas surgen diversos inconvenientes que hace que tecno económicamente la incorporación del ciclo combinado no sea rentable.

También expone que para potencias más bajas el ciclo combinado consigue mantener unas eficiencias mayores que con respecto a un ciclo único Rankine. Por esto, el ciclo combinado parece ser sólo atractivo para las plantas de torres de energía muy pequeñas (por debajo de 5 Mwe). Pero hay un problema, aunque las turbinas de gas se pueden reducir bastante bien teniendo un rendimiento razonable a pequeñas potencias en los ciclos Rankine de vapor no sucede así.

Debido a esto se considera el uso de la tecnología de Rankine Orgánico como ciclo de baja en un ciclo combinado de muy pequeña potencia (considerado micro). Este concepto podría ser atractivo para las pequeñas y modulares centrales receptoras de CSP para “islas de electricidad”. Es decir, pequeñas redes remotas, donde el precio de la electricidad es muy alto.

1.2. Aplicación

Este estudio se encuentra centrado en investigar para una determinada aplicación bastante específica. Concretamente trata de incorporar un ciclo Rankine orgánico como ciclo de baja en un ciclo combinado, compuesto por un Brayton abierto como ciclo de alta. Todo esto queda englobado en que este ciclo será utilizado en una planta termosolar de unas dimensiones reducidas, ya que el propósito es estudiar plantas que generen menos de 5 MWe.

Por ello el campo de heliostatos necesario será de unas dimensiones reducida, al igual que únicamente será necesaria una única torre de recepción solar. Todo esto es bueno desde el punto de vista económico ya que al no suponer una inversión al se hace más asequible su viabilidad.

Debido a estudiar centrales termosolares de torre central será posible obtener altas temperaturas de entrada a la turbina que permitan utilizar el ciclo Brayton con unas eficiencias

razonables. Por ello, surge la posibilidad de utilizar receptor volumétrico abierto de aire atmosférico los cuales han sido investigados en [2] y [3]. Con este tipo de receptores se obtiene aire a altas temperaturas, que puede ser utilizado de manera directa o como se ve en [4] mediante un sistema de almacenamiento de calor basado en regeneradores que aparece en la Ilustración 1.

Debido a la posible localización de estas centrales en zonas donde el agua escasea, se estudiará el ciclo Rankine orgánico funcionando con condensadores de aire que permitiendo emplazar la planta en cualquier zona sin depender de una fuente de agua, acosta de obtener peores eficiencias en el ciclo Rankine orgánico.

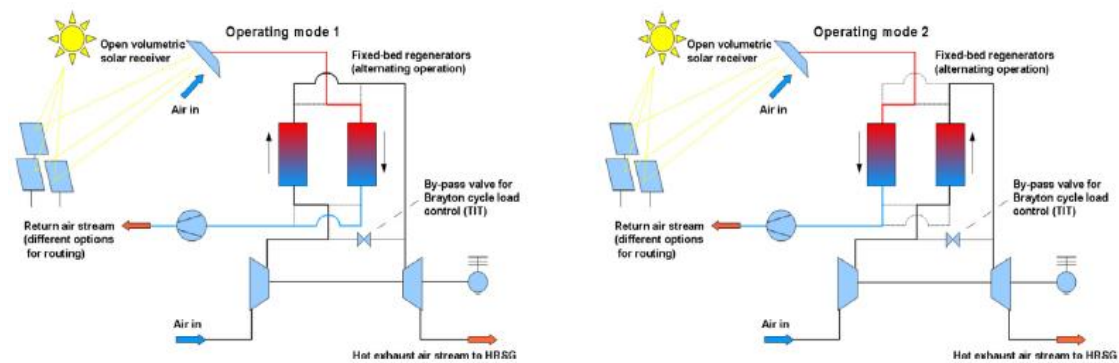


Ilustración 1 Brayton con receptor volumétrico abierto y acumuladores de calor regenerativos [4]

1.3. Objetivos

En este trabajo fin de master se han empleado distintos programas que permiten modelar ciclos termodinámicos con distintos fluidos de trabajo. En los inicios del trabajo el objetivo principal era la búsqueda de información acerca distintos avances en las plantas termosolares. A continuación, de artículos de ciclos orgánicos Rankine, sus distintas aplicaciones y configuraciones. Así como de los distintos fluidos orgánicos y sus procesos de selección para diversas aplicaciones. Una vez que ya se tenía la información necesaria empezó a realizar distintas tareas. El objetivo principal era el modelado de los ciclos ORC que permitiese recoger información acerca de estos para poder llevar a cabo:

- Caracterización de los ciclos ORC para distintos rangos de TIT y T_{amb} .
- Elección del fluido orgánico de trabajo para la aplicación 1.2.

Esta serie de objetivos eran necesarios ya que permiten llevar a cabo el complemento del Trabajo final de master en el que se modelan ciclos combinados con ciclos ORC como ciclos de baja.

2. Estado del arte

En este apartado se encontrará una base teórica sobre la que se sustenta este trabajo fin de master y el complemento de trabajo fin de master. En él nos encontraremos tanto una introducción de diversos contenidos importantes a recalcar como una base teórica de cómo se han llevado a cabo los diferentes estudios.

2.1. Introducción sobre las necesidades de explotar las energías renovables:

La electricidad se ha vuelto imprescindible en nuestro día a día, eso queda patente con la tendencia creciente de la demanda de energía eléctrica. Con el objetivo de producir la energía eléctrica, se emplean diferentes materias primas. La mayor parte del consumo de energía eléctrica a nivel mundial proviene de sectores con fuentes de energía no renovables (carbón, petróleo, gas natural y nuclear). Estas fuentes de energía aparte de no ser renovables tienen el problema de que producen altos niveles de contaminación. Como la emisión de CO_2 , CO , SO_2 , partículas, ozono troposférico y otras sustancias químicas peligrosas.

Estas sustancias producen una serie de problemas perjudiciales para los seres vivos. Entre ellos un problema muy importante es el cambio climático, el cual está cada vez más presente en nuestras vidas y de una forma más acentuada con el paso del tiempo. Debido a esto la producción energética mundial debe cambiar hacia fuentes de producción más limpias que no contribuyan a un aumento de la contaminación. Dentro de las energías limpias se encuentran:

- *La hidráulica*: Este tipo de tecnología de generación de energía eléctrica es capaz de aprovechar la diferencia de alturas de agua para generar energía eléctrica.
- *La eólica*: Este tipo de tecnología de generación de energía eléctrica es capaz de aprovechar la fuerza del viento mediante un aerogenerador para generar energía eléctrica.
- *La solar fotovoltaica o la termosolar*: Este tipo de tecnología de generación de energía eléctrica es capaz de aprovechar la radiación solar para generar energía. Cada una de ellas lo hace por un principio distinto. La fotovoltaica, se basa en el efecto fotoeléctrico, por el cual determinados materiales son capaces de absorber fotones y liberar electrones, generando una corriente eléctrica. La termosolar, se basa en concentrar la radiación en determinados puntos, mediante dispositivos que aprovechan los principios fundamentales de la reflexión para direccionar la radiación incidente. Con ello calentar un fluido el cual permite generar electricidad mediante un ciclo termodinámico.
- *Otras*: Muchas otras tecnologías podrían ser nombradas y no por no serlo dejan de tener importancia. Dentro de este grupo se podría englobar a tecnologías como mareomotriz, geotérmica, undimotriz. También capaces de aprovechar una fuente renovable de energía para producir energía eléctrica.

Todas estas formas de producción de energía tienen en común que en comparación con la producción mediante combustibles fósiles emiten mucha menos contaminación al medioambiente. Por lo tanto, debido a que la energía es básica en la sociedad actual y cada vez aumenta más la demanda de energía es de vital importancia la investigación en este tipo de generación energética. Para ver una comparativa del porcentaje de generación eléctrica con energías renovable con respecto a las no renovables se puede observar la Ilustración 2. En ella se puede observar el porcentaje de generación eléctrica a nivel mundial de los distintos tipos de energías renovables, los cuales comparados en su conjunto con las energías no renovables representan un únicamente una cuarta parte del total. Esto corrobora la necesidad de promover la implantación e investigación de estas tecnologías.

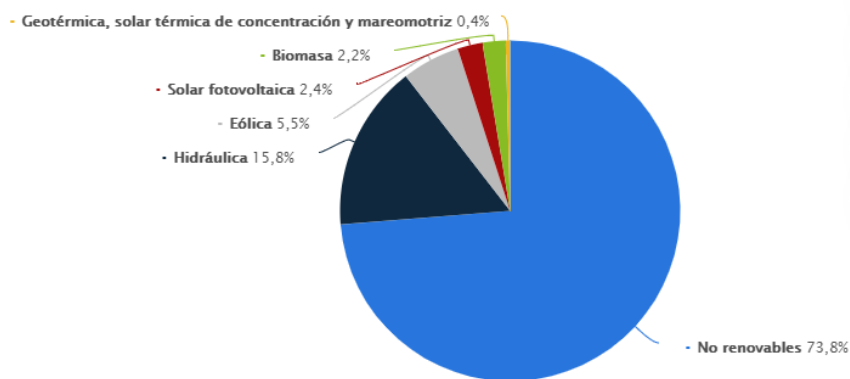


Ilustración 2 Distribución porcentual de la generación de electricidad en el mundo, por fuente de energía

2.2. Introducción sobre la producción de energía solar termoelectrica

Esta tecnología aprovecha la radiación solar para obtener energía térmica a altas temperaturas. Esto lo consigue concentrando la radiación en determinados puntos, mediante dispositivos que aprovechan los principios fundamentales de la reflexión para direccionar la radiación incidente. Estos puntos de concentración dependen de la tecnología utilizada. Por ellos circula el fluido portador del calor, el cual debe de tener unas propiedades específicas que permitan cumplir su función y difiere dependiendo de la tipología de la planta. Este fluido caloportador absorbe la energía y aumenta su temperatura, eso permite utilizar este fluido para generar energía eléctrica mediante un ciclo termodinámico.

El principio de funcionamiento parece bastante sencillo a priori. Aunque debido a la competencia en precios con otras formas de producción de energía, surge la necesidad de optimizar la eficiencia de las CSP. Con el fin de optimizar la eficiencia de estas plantas surgen diversas líneas de investigación que mejoren cada componente, configuración, almacenamiento y funcionamiento.

2.2.1. Funcionamiento de las plantas de concentración solar (Concentrated Solar Power, CSP)

Para llevar a cabo la concentración de la radiación solar se emplean lentes y espejos con alta reflectividad. Los cuales debido a su geometría y orientación son capaces de direccionar la radiación solar. En este tipo de centrales únicamente se aprovecha la radiación directa, debido a que la radiación difusa no puede ser concentrada en un punto. Una vez que se ha concentrado la radiación solar, el absorbedor es el componente que realiza la transformación

en energía interna del fluido caloportador. Dependiendo del fluido caloportador utilizado este puede ser directamente introducido a la turbina o no. A continuación, mediante un ciclo termodinámico se genera electricidad, el ciclo debe de ser el adecuado para cada tipo de configuración de planta. En este tipo de plantas cabe la posibilidad de almacenamiento térmico dependiendo de la configuración de planta utilizada y el fluido caloportador.

La concentración de la radiación mejora la relación (W/m^2) en el absorbedor. Esto provoca aumento de la potencia absorbida, aumento de la TIT y aumento del rendimiento termodinámico. Debido al aumento de la concentración también aumentan las pérdidas de calor, tanto por convección como por radiación del absorbedor con el ambiente.

2.2.2. Tipos de plantas de concentración solar en función del tipo de concentrador y sus características

Dentro de las plantas de concentración solar hay distintas configuraciones posibles que permiten concentrar la radiación solar. Las cuatro tecnologías más importantes son:

Cilindro-parabólico:

Esta tecnología utiliza espejos con forma cilindro - parabólica, los cuales son los encargados de reflejar la irradiación sobre un tubo absorbedor por el que circula el fluido caloportador. El fluido calo portador es aumenta su temperatura para posteriormente producir electricidad. Los concentradores solares varían si posición respecto a un eje para realizar un seguimiento del sol diario y obtener el mayor rendimiento.es una de las tecnologías más utilizadas actualmente junto con al de torre central, con la diferencia de que la temperatura alcanzada con esta tecnología es inferior a la que se alcanza en las de torre central.

Fresnel Lineal:

En esta tecnología se utilizan los espejos planos que reflejan la radiación solar a una distancia focal mayor que en el caso de cilindro- parabólico. Esta tecnología utiliza espejos planos ya que es menos complejo su diseño y su coste de fabricación, que en el caso del cilindro- parabólico, a costa de perder rendimiento en el receptor.

Receptor central de torre:

Este tipo de tecnología utiliza un receptor solar que se coloca a una altura sobre una torre. Sobre este receptor se concentra irradiación solar que viene reflejada por unos espejos, denominados heliostatos, colocados alrededor de la torre y con capacidad de direccionar la irradiancia hacia el receptor solar. Con este tipo de tecnología se consiguen altas temperatura y permite generar altas potencias.

Disco parabólico:

Esta tecnología utiliza un disco parabólico sobre el que llega la irradiación solar y la refleja sobre un receptor central con un motor Stirling donde la radiación es concentrada. Este tipo de tecnología permite realizar un seguimiento solar en dos ejes. También permite obtener concentraciones muy altas, debido a su curvatura parabólica y su baja relación distancia focal / diámetro. Todo esto permite obtener la mejor eficiencia de todas las tecnologías expuestas.

En la Ilustración 3 se puede observar de manera gráfica lo expuesto anteriormente en este apartado

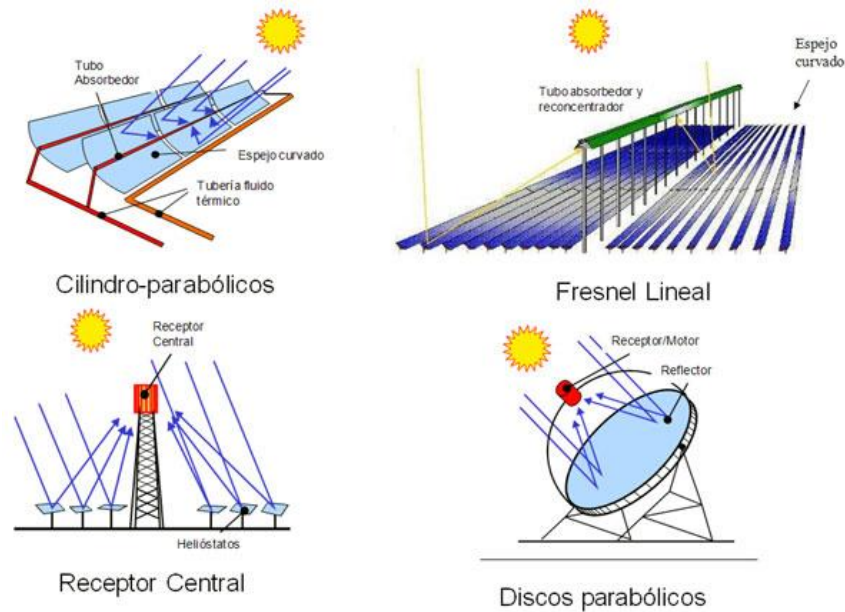


Ilustración 3 Tipos de plantas de concentración solar

2.3. Plantas CSP con receptor central de torre

2.3.1. Características y componentes

El principio básico de funcionamiento es el mismo que ya se ha expuesto en la sección 2.2, que es el mismo para todos los tipos de plantas de concentración. Las plantas CSP con receptor central se caracterizan por tener unos niveles de concentración de más de 700. Esto permite alcanzar temperaturas de más de 1000°C, que permiten obtener un rendimiento solar – eléctrico superiores al 30%.

Los principales componentes de estas plantas (SRC) son:

- Heliostatos: Su función principal es reflejar la radiación solar y dirigiéndola al receptor. Estos se componen de espejos de vidrio que, soportados por una estructura móvil, son capaces mediante un mecanismo de orientarse y así orientarse en la posición óptima.
- La torre: Es una estructura capaz de soportar el receptor y elevarlo a una altura considerable para evitar en lo posible sombras y bloqueos.
- El receptor: Se trata del componente más estudiado y que más impacto tiene sobre todo en el rendimiento solar –térmico. Esto se debe a que este es el encargado de captar el calor de la radiación concentrada y transferirlo al fluido caloportador, la localización del receptor es en la parte superior de la torre. Actualmente se encuentran receptores con distintas geometrías y distintos funcionamientos. Los principales tipos según el mecanismo empleado para la transferencia de la energía al fluido son [5], [6], [7]:
 - Receptores no volumétricos:

Este tipo de receptores se caracterizan porque la radiación incide sobre una superficie que trasmite la energía a un fluido. Estos pueden a su vez pueden ser: De placa, en los que la radiación incide sobre una placa, a la que van adosados los tubos a través de los cuales circula el fluido o Tubulares, en los que los rayos solares inciden directamente sobre los tubos.

Dependiendo de la disposición de los tubos y las placas se pueden encontrar diversos tipos de receptores, como se puede ver en la Ilustración 4, los cuales tiene sus ventajas e inconvenientes.

Los receptores no volumétricos obtiene peores rendimientos que los receptores volumétricos, aunque son más robustos, están más estudiados y su fabricación es más simple

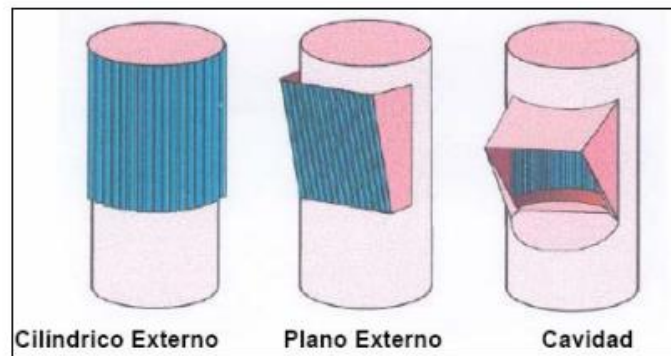


Ilustración 4 Receptores solares no volumétricos

o Receptores volumétricos:

En este tipo de receptores la radiación incide sobre una superficie con un ángulo perpendicular a ella. El fluido habitual no es agua, o sales, sino un fluido gaseoso, normalmente aire. Este aire circula por la parte trasera del receptor, refrigerándolo y a la vez aumentando de temperatura. La superficie sobre la que incide la radiación puede ser metálica o cerámica, aunque esta debe de ser porosa para tener micro cavidades por las que circula el aire. Se pueden encontrar dos tipos de receptores volumétricos: Atmosféricos o Presurizados, ambos se pueden ver en la Ilustración 5.

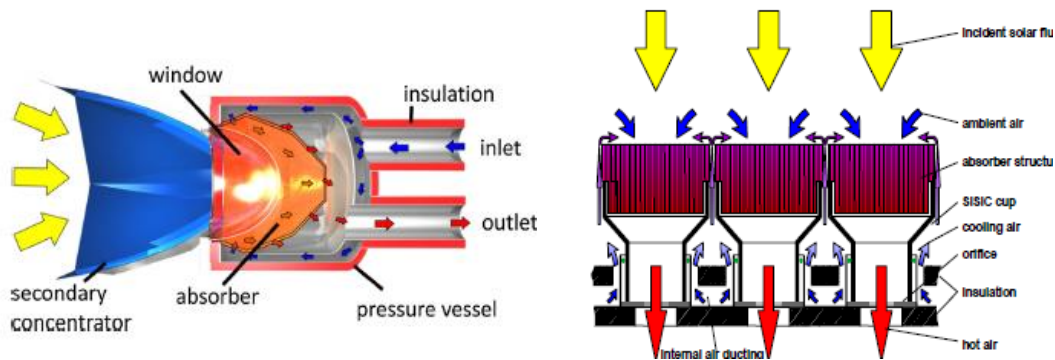


Ilustración 5 Receptor volumétrico presurizado (Izquierda) y Receptor volumétrico atmosférico (Derecha)

Estos serían los componentes principales de una planta CSP con receptor central (CRS). Como en toda planta de generación eléctrica queda transformar esta energía térmica en energía eléctrica, para ello se explorarán diversas posibilidades con distintas configuraciones del ciclo termodinámico en el apartado 2.3.2. Otro aspecto de estas plantas que incluiría componentes en la planta termosolar sería el almacenamiento, este es una de las cualidades más importantes de estas plantas y por lo tanto se explorará más a fondo en la sección 2.3.5.

2.3.2. Ciclos termodinámicos en plantas CSP con receptor central

Actualmente en las plantas de CSP con receptor central, el ciclo Rankine es el más utilizado, al igual que con otro tipo de tecnologías de concentración solar como la cilindro - parabólico. Esta tecnología está en continuo estudio y en muchos de los artículos se encuentra como aprovechar el calor residual. Los ciclos ORC y el ciclo Kalina son lo más nombrados y estudiados. Debido a la aportación tecnológica de los recetores volumétricos es posible incluir ciclos Brayton en plantas CSP con receptor central. A continuación, se expondrán los diferentes ciclos y sus características [8]:

Ciclo Rankine

El ciclo Rankine, también denominado ciclo de vapor, es un ciclo de potencia que emplea el agua en fase líquida y gaseosa como fluido de trabajo. El ciclo consiste en distintas fases. Comienza aumentando la presión del agua en una bomba, a continuación, se le realiza un aporte energético al ciclo en forma de calor que permite evaporar el fluido. Una vez se encuentra en estado gaseoso se hace pasar por una turbina para el aprovechamiento de la energía del vapor y producir energía mecánica que, gracias a un alternador, se convertirá en energía eléctrica. Por último, a la salida de la turbina, el fluido pasa por un condensador, donde el fluido cede energía y así el agua consigue las condiciones de líquido saturado para entrar posteriormente en la bomba iniciando de nuevo el ciclo termodinámico.

La instalación general del ciclo es la formada por los cuatro componentes principales: turbina, condensador, bomba y caldera o cualquier tipo de fuente de calor. Se puede observar en la Ilustración 6, donde además se encuentra el diagrama T-s correspondiente al ciclo.

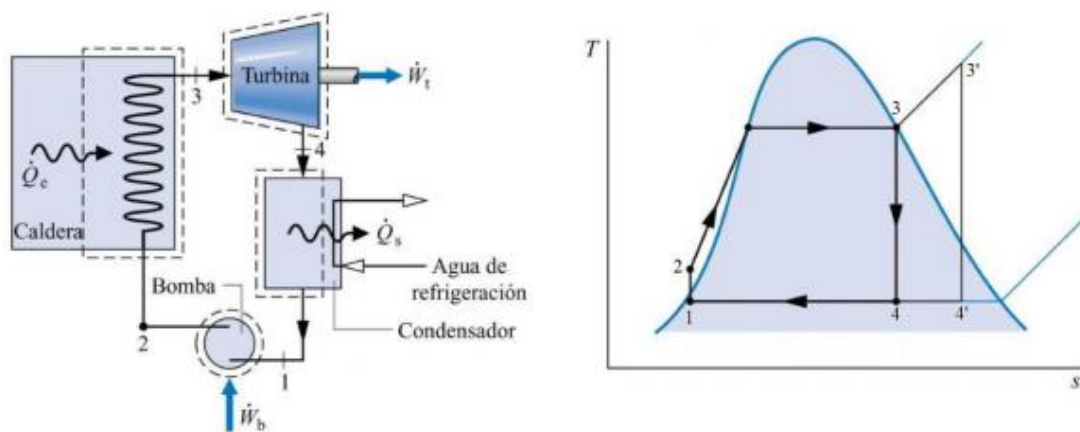


Ilustración 6 Instalación general del ciclo Rankine y Diagrama T-s

Los procesos que componen el ciclo Rankine, representados en el diagrama T-s son:

1-2: Compresión isoentrópica en la bomba. Realmente el proceso en ciclo real no es isoentrópico. La bomba suele tener un rendimiento isoentrópico cercano al 85%. El aumento de temperatura en la bomba es mínimo ya que como se puede observar en el diagrama T-s, en la región de líquido subenfriado (región a la izquierda de la curva de líquido saturado) las isóbaras están muy cercanas y el aumento de temperatura del agua es pequeño.

2-3': Calentamiento del agua y evaporación del mismo a presión constante en el interior de la caldera.

3'-4': Expansión isoentrópica en la turbina. En el ciclo real este proceso no se realiza de forma isoentrópica, sino que la turbina consta de un rendimiento isoentrópico del 90-95% obteniéndose una entalpía a la salida de la turbina ligeramente superior a la del punto ideal.
4'-1: Condensación. Enfriamiento y cambio de fase a presión y temperatura constante en el condensador.

En el ciclo Rankine, la relación de trabajo consumido por la bomba respecto al producido por la turbina no supera el 5% y las temperaturas máximas del ciclo rondan los 600 °C.

Ciclo Rankine Orgánico

El ciclo Rankine Orgánico es una variación del ciclo Rankine general. En ciclo ORC utiliza fluidos orgánicos de alta masa molecular, que presentan un punto de ebullición a temperaturas más bajas. Estos ciclos orgánicos de Rankine operan a presiones y temperaturas menores, por lo tanto, la complejidad de la instalación es menor y, en consecuencia, el coste de la instalación también. La configuración utilizada en estos ciclos es la misma que en el ciclo Rankine de agua, solo que los ORC en muchas ocasiones utilizan un recuperador como se puede apreciar en la Ilustración 7. Con ello consiguen un mejor aprovechamiento del calor aportado al ciclo con un mejor rendimiento. El diagrama del ciclo depende en parte del fluido orgánico utilizado y el modo de operación elegido. Todo esto será objeto de estudio y aparece reflejado en la sección 3.

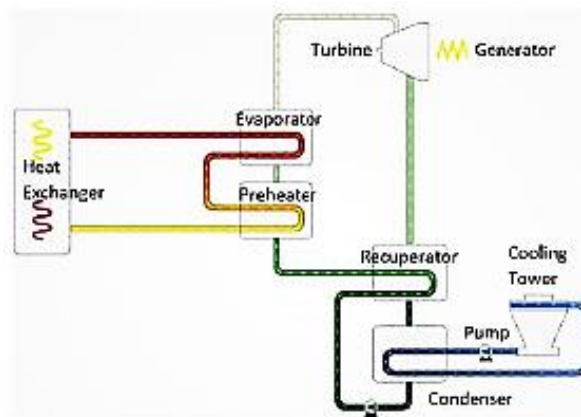


Ilustración 7 Ciclo Orgánico Rankine

Normalmente este tipo de ciclos son utilizados para aprovechar calores residuales de un rango de (400 a 100) °C. En diversos artículos [9] estos ciclos son estudiados para aplicaciones en planta de biomasa, geotermia y solar. En concreto en este estudio serán utilizados como ciclo de baja en un ciclo combinado.

Ciclo Kalina

El ciclo Kalina es otra de las posibles soluciones dentro del grupo de los ciclos termodinámicos para la recuperación de calor. Este tipo de ciclo utiliza una mezcla de fluido de trabajo compuesta por agua y amoníaco, además de contar con una configuración distinta a la del ciclo Rankine convencionales. Una característica peculiar en este tipo de ciclo es que, como se puede observar en el diagrama T-S de la Ilustración 8, la temperatura no se mantiene constante en el cambio de fase de líquido a gas. Esto sucede porque como el fluido de trabajo es una mezcla binaria cada fluido tiene un punto de ebullición distinto y por lo tanto no entran en ebullición de la misma manera.

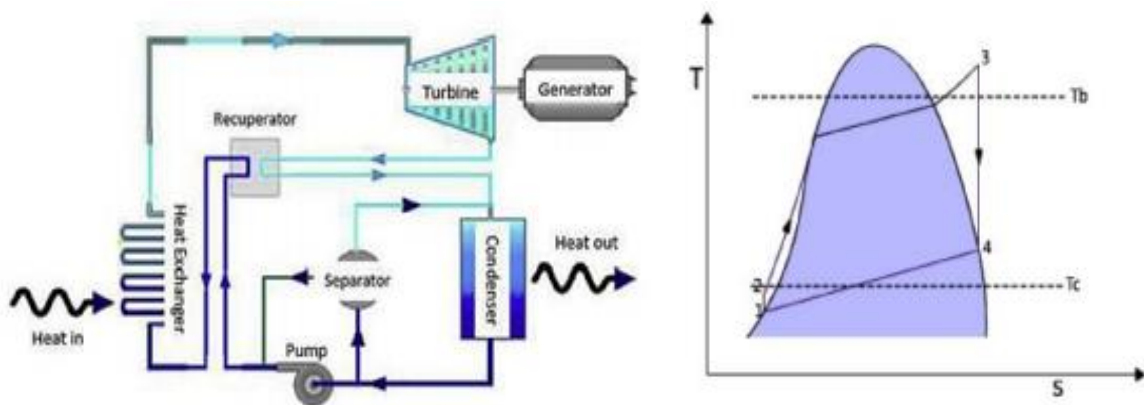


Ilustración 8 Ciclo Kalina y Diagrama T-s

Ciclo Brayton

El ciclo Brayton suele funcionar en ciclo abierto, es decir, los gases de escape de la turbina de gas se expulsan al ambiente y el compresor se alimenta de aire frío del exterior. Aunque también se puede trabajar en ciclo cerrado, incluyendo un intercambiador de calor que une la salida de la turbina con el compresor. En los esquemas que aparecen en la Ilustración 9, se puede apreciar la diferencia del ciclo abierto y el cerrado. En concreto el ciclo abierto que aparece será el utilizado en este estudio y se sustituirá la cámara de combustión por otro tipo de componente que desempeña la misma función de aportar calor al ciclo, esto será expuesto en el Complemento del Trabajo final de Master.

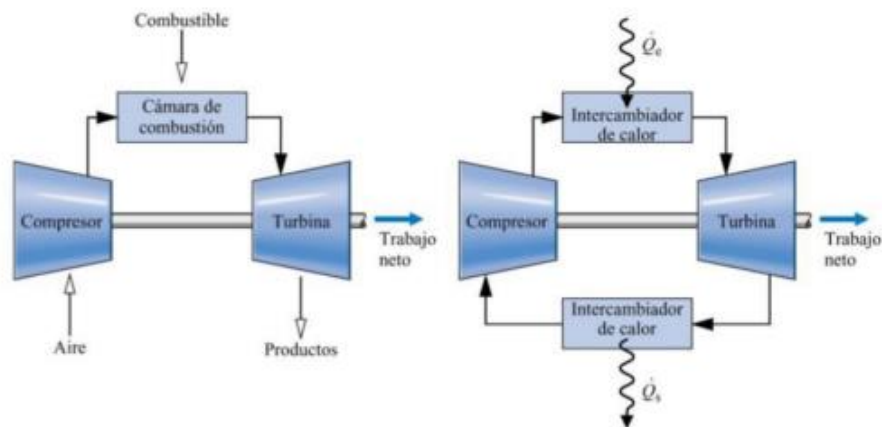


Ilustración 9 Esquema de la instalación de un ciclo Brayton abierto (izquierda) y cerrado (derecha)

El ciclo Brayton consiste en los siguientes 4 procesos. En la Ilustración 10 se muestra tanto el ciclo ideal (1-2s-3-4s) como el ciclo real de operación (1-2-3-4) en un diagrama T-s.

1-2s: Compresión isoentrópica En el caso del ciclo real 1-2 representa la compresión del aire en compresor real con rendimiento isoentrópico inferior al 100%

2s-3: Combustión, en el caso de ciclo abierto, o absorción de calor, en el caso de ciclo cerrado, a presión constante.

3-4s: Expansión isoentrópica en la turbina de gas En el caso real 3-4 representa la expansión del gas en una turbina con un rendimiento isoentrópico en torno al 90%, obteniendo así una entalpía superior a la salida y una potencia útil inferior que en el ciclo ideal 2.

4s-1: Pérdida de calor a presión constante en el caso de ciclo cerrado, y en el caso de ciclo abierto, esta línea no existe

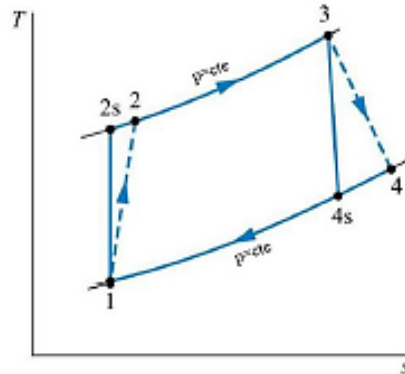


Ilustración 10 Diagrama T-s ciclo Brayton

En el caso del ciclo Brayton, la relación de trabajo consumido por el compresor respecto de la turbina es del 30-40%, muy superior a la de ciclo Rankine donde la relación del trabajo consumido por la bomba respecto al producido por la turbina no supera el 5%. En el caso del ciclo Brayton las temperaturas alcanzadas son muy superiores a las del ciclo Rankine, permitiendo TIT mayores.

Ciclo combinado

El ciclo combinado se fundamenta en la unión de dos ciclos termodinámicos, normalmente se trata de la unión de un ciclo Brayton como ciclo de alta y un Rankine como ciclo de baja, que funcionan de manera conjunta. Aunque también existen ciclos combinados con otro tipo de combinaciones de ciclos. La base del ciclo combinado consiste en el aprovechamiento de las altas temperaturas del ciclo de alta para la evaporación del fluido del ciclo de baja en una caldera de recuperación de gases (HRVG: Heat Recovery Vapour Generator) y su posterior expansión en la turbina del ciclo de baja. El esquema general de un ciclo combinado se puede observar en la Ilustración 11.

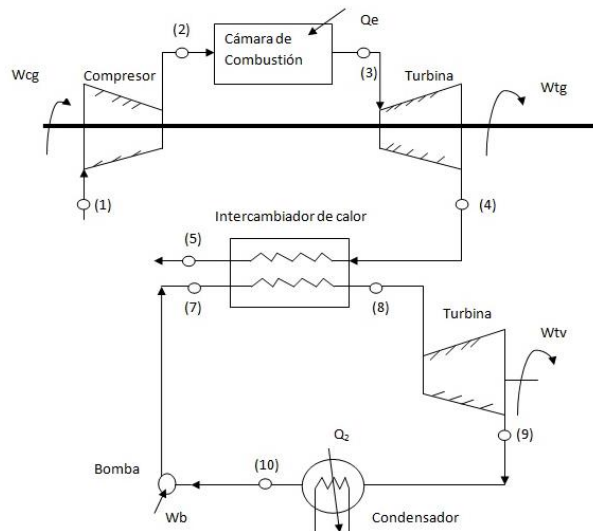


Ilustración 11 Esquema del ciclo combinado

La utilización del ciclo combinado para la producción de electricidad permite conseguir rendimientos superiores que si se realiza la generación con ciclos simples por separado. Este rendimiento superior se puede justificar sabiendo que una máquina térmica que trabaja entre dos focos térmicos, uno frío y otro caliente, tendrá mayor rendimiento cuanto mayor sea la diferencia entre la temperatura de dichos focos, como explica el rendimiento máximo de Carnot que se puede apreciar en la Ilustración 12. En concreto al combinar dos ciclos el aprovechamiento del calor es mayor, ya que el foco frío se ve reducido, lo que hace que el rendimiento sea mayor.

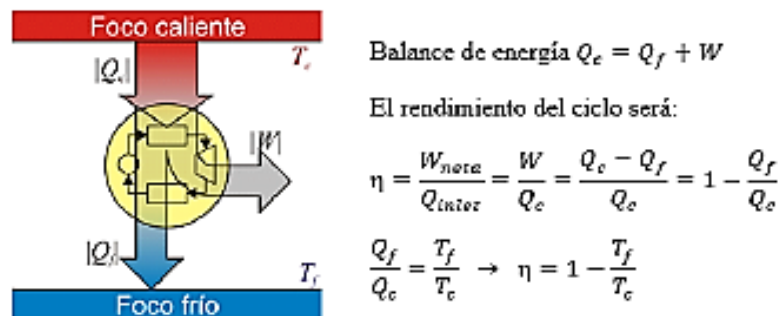
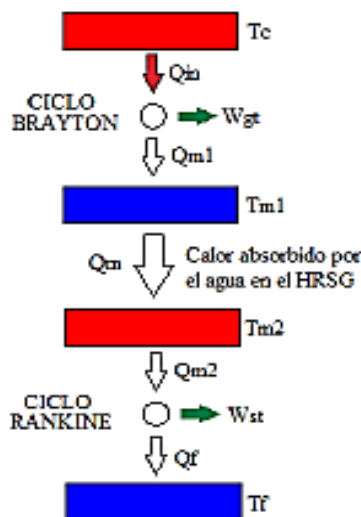


Ilustración 12 Rendimiento de Carnot

Para compara el rendimiento del ciclo combinado con los rendimientos individuales de los ciclos Brayton y Rankine. Se realiza el desarrollo en función de los flujos de calor y el trabajo que aparecen en la

Ilustración 13 del que se obtiene el rendimiento del ciclo combinado en función de los ciclos que lo forman como se puede observar en la Ecuación 1.

Con esta expresión se puede comparar con los rendimientos de los ciclos Rankine y Brayton, de la que se puede concluir que mediante el ciclo combinado se consigue un rendimiento superior a los ciclos individuales.



$$\eta_{CC} = \frac{W_{NETA}}{Q_{IN}} = \frac{W_{GT} + W_{ST}}{Q_{IN}} = \frac{W_{GT}}{Q_{IN}} + \frac{W_{ST}}{Q_{IN}} * \frac{Q_M}{Q_M}$$

$$\eta_{GT} = \frac{W_{GT}}{Q_{IN}} ; \eta_{CC} = \frac{W_{ST}}{Q_M}$$

$$\frac{Q_M}{Q_{IN}} = \frac{Q_{IN} + W_{GT}}{Q_{IN}} = 1 - \eta_{GT}$$

$$\eta_{CC} = \eta_{GT} + \eta_{ST} * (1 - \eta_{GT})$$

Ecuación 1 Rendimiento del ciclo combinado en función de los ciclos individuales

Ilustración 13 Diagrama de un ciclo combinado

2.3.3. Modelado de una planta CSP con receptor central

Para llevar a cabo la modelación de la planta es necesario dividir en dos términos:

- i. El modelo de conversión de energía solar a térmica, que depende de la eficiencia de los heliostatos y del receptor solar
- ii. El modelo de conversión de energía térmica a eléctrica, que depende del ciclo termodinámico adoptado para llevar a cabo la transformación.

El modelizado global de la planta que comprende la conversión de energía solar a eléctrica quedaría definido por el producto del rendimiento solar-térmico y el rendimiento térmico – eléctrico.

Rendimiento solar- térmico

Debido a que los factores de concentración en este tipo de plantas son bastante elevados es importante modelizar las pérdidas del rendimiento solar – térmico, para así observar la tendencia y determinar el punto óptimo de funcionamiento:

El rendimiento solar- térmico se define mediante la Ecuación 2. Esta ecuación está compuesta por dos rendimientos η_f la eficiencia óptica del campo de heliostatos y η_r representa la eficiencia térmica del receptor. Ambos quedan definidos en la Ecuación 3 y la Ecuación 4. De los términos que aparecen en dichas ecuaciones I representa el flujo de radiación incidente (W/m^2), DNI representa la radiación normal directa, A_a representa el área de apertura del receptor, A_r representa el área del receptor, α representa la absorptividad solar del receptor solar, σ constante de Stefan – Boltzmann ($W/(m^2 K^4)$), ε representa la emisividad térmica del receptor, h representa el coeficiente de transferencia de calor convectivo del receptor ($W/(m^2K)$), T_r representa la temperatura del receptor (K), T_a representa la temperatura ambiente (K). Este modelado se obtuvo de [4] donde se puede observar en sus anexos un desarrollo más extendido de estas ecuaciones.

$$\eta_{Solar-Térmico} = \eta_f \cdot \eta_r$$

Ecuación 2 Rendimiento Solar-Térmico

$$\eta_f = \frac{C_{flux}}{C_{hyp}} \quad ; \quad C_{flux} = \frac{I}{DNI} \quad ; \quad C_{hyp} = \frac{A_a}{A_r}$$

Ecuación 3 Eficiencia óptica el campo de heliostatos

$$\eta_r = \alpha - \frac{\sigma \varepsilon (T_r^4 - T_a^4) + h(T_r - T_a)}{C_{flux} \cdot DNI}$$

Ecuación 4 Eficiencia Térmica del receptor

Los parámetros de los que depende el rendimiento solar- térmico son numerosos. Estos parámetros dependen de las condiciones ambientales que se estén desarrollando, por lo que muchos de ellos se fijan para valores característicos que permitan realizar comparaciones. Los parámetros también dependen en gran medida de la tipología de receptor utilizado. En este estudio se utilizará el receptor volumétrico abierto. Actualmente los receptores volumétricos se encuentran en estudio y permiten obtener mejores rendimientos solares – térmico que los no volumétricos. En concreto en este estudio se fijará el valor de eficiencia óptica de los heliostatos en 0.75. Obteniendo unos valores de rendimiento solar - térmico en función de la concentración solar y del rendimiento del receptor.

Rendimiento térmico –eléctrico. (η_{th})

Este rendimiento depende del ciclo seleccionado para la conversión de la energía y a configuración del mismo. Diferentes configuraciones serán examinadas y modeladas en lo largo de este estudio. Como se vio en la sección 2.3.2 existen diferentes posibilidades de elección, pero en todo el rendimiento global del ciclo acaba siendo definido por la Ecuación 5 .

$$\eta_{\text{térmico-eléctrico}} = \frac{W_{NETA}}{Q_{IN}}$$

Ecuación 5 Rendimiento térmico-eléctrico

En este estudio se utilizarán distintos programas que permiten modelar los ciclos termodinámicos y obtener distintos resultados de ellos. Con ellos podremos obtener los valores de rendimiento térmico - eléctrico.

Rendimiento Solar – Eléctrico

Como ya se explicó anteriormente este rendimiento es producto de los dos anteriores. Por lo que queda definido por la Ecuación 6 Rendimiento solar - eléctrico Ecuación 6.

$$\eta_{\text{Solar-Eléctrico}} = \eta_{\text{Solar-Térmico}} * \eta_{\text{Térmico-Eléctrico}}$$

Ecuación 6 Rendimiento solar - eléctrico

Mediante este parámetro se expresa la eficiencia global de la planta, teniendo en cuenta todo el proceso de transformación de la energía desde la radiación procedente del sol, pasando está a energía térmica y generando energía eléctrica que es el propósito final. Por lo tanto, este parámetro es sobre el que se debe de fijar el punto óptimo de trabajo. También nos permite comparar con otro tipo de planta de producción eléctrico mediante la radiación solar. Como puede ser el caso de la fotovoltaica, otras plantas CSP con distinto tipo de concentrador u mismo tipo de concentrador con distinto ciclo termodinámico.

2.3.4. Plantas CSP instaladas a nivel nacional e internacional.

En relación con la potencia instalada a nivel mundial y nacional, las plantas CSP representan un porcentaje muy bajo si las comparamos con otro tipo de tecnologías. En los últimos años hay países que están apostando fuerte por este tipo de tecnología, aunque en España desde 2013 la instalación de nuevas plantas se encuentra parada.

En España se encuentra instaladas 50 plantas de CSP con una potencia instalada de 2300 MWe, estas plantas se instalaron en el periodo temporal de 2007 a 2013. En su mayoría la tecnología de concentración empleada ha sido la de cilindro parabólico, aunque también hay tres plantas con receptor de torre y dos de con concentradores tipo Fresnel.

De las de receptor de torre: Las plantas PS-10 y PS-20 emplean una tecnología de vapor saturado que alimenta un ciclo Rankine, con generación directa y receptor de cavidad. La configuración es muy simple lo cual simplifica mucho su modo de operación. La planta Gema Solar emplea una tecnología con receptor cilíndrico externo de sales fundidas como fluido caloportador, que alimenta un ciclo Rankine. Esto permite incorporar un sistema de almacenamiento, capaz de almacenar hasta 15 horas de energía para después suministrarlas en ausencia de luz solar.

A nivel internacional hay distintos países con plantas de CSP ya instaladas, aunque el país que más destaca en este aspecto es China. La India también destaca por tener varias plantas en desarrollo con tecnología novedosa. En total a nivel mundial hay 6155,41 MWe instalados, 1224 MWe en construcción y 1349 MWe en desarrollo. La tendencia a nivel mundial de instalación se podría equiparar a la de España, aunque actualmente está aumentando la instalación de plantas de receptor de torre con respecto al cilindro parabólico.

Todos los datos mostrados en esta sección 2.3.4 fueron obtenidos de [10], donde se puede observar de una forma más detallada los datos expuestos, así como un mapa de los emplazamientos de las plantas de CSP a nivel nacional.

2.3.5. Tipos de operación de las plantas termosolares

Una de las ventajas más importantes de las plantas termosolares con respecto a otro tipo de tecnologías del ámbito de las renovables es su capacidad de almacenamiento térmico de la energía. Esto permite absorber energía térmica en un periodo de alta irradiación y poder continuar produciendo energía eléctrica en periodos en los que la irradiación es baja o incluso inexistente. La capacidad de almacenamiento de energía de una planta depende directamente de la capacidad de producción de energía de la planta, ya que para poder almacenar energía es necesario sobredimensionar ya que requiere de un mayor campo solar.

Dependiendo del modo de operación de las plantas termosolares podemos dividirlo en los siguientes tipos:

Producción Directa

La producción directa carece de almacenamiento, se basa en únicamente generar en los periodos de irradiación y de no generar en los periodos de baja o nula irradiación. En concreto este tipo de operación es la que requiere el mínimo coste de componentes, a costa de no tener capacidad de almacenar energía térmica.

Almacenamiento activo

El almacenamiento activo se basa en tener un medio de almacenamiento de calor que es un fluido que circula, el cual es almacenado y proporciona calor sensible. El almacenamiento activo se puede dividir en dos tipos:

- Activo directo: El almacenamiento activo directo una parte del fluido de transferencia es bombeado a unos tanques de almacenamiento altamente aislados. De forma simplificada, una fracción del fluido es almacenada directamente en tanques.
- Activo indirecto: El almacenamiento activo indirecto el medio de almacenamiento y el fluido de transferencia son diferentes

Almacenamiento pasivo

En el almacenamiento pasivo se pueden almacenar calor sensible o calor latente. En concreto se caracterizan porque el medio de almacenamiento no circula. El almacenamiento pasivo se puede dividir en dos tipos:

- Pasivo por calor sensible: El almacenamiento pasivo por calor sensible emplea medios sólidos para efectuar el almacenamiento. Se bombea el fluido de transferencia por el medio sólido el cual absorbe energía térmica y viceversa. Los materiales entre los que se produce la transferencia suelen ser: aire-hormigón o aire -cerámico.
- Pasivo por calor latente: El almacenamiento pasivo por calor latente se emplea el calor latente del cambio de fase, el cual es entestado a temperatura constante durante el proceso de descarga. De forma simplificada, utilizan el cambio de fase de un fluido para almacenar energía.

2.4. Introducción tecno-económica

Debido a la necesaria optimización de la planta termosolar para hacerla más competitiva en las subastas de energía, surgen diversas áreas en las que se puede investigar y llegar a mejoras que optimicen la planta termosolar. Una de los puntos a optimizar es la conversión térmica a eléctrica. Para ello es primordial encontrar el ciclo termodinámico que mejor se adapte a las características de una planta termosolar con sistema de recepción central. Con este propósito se buscaron distintas posibilidades prometedoras.

Una de las posibilidades que se encontró fue el aplicar un ciclo combinado (Brayton + Rankine), esta posibilidad fue abordada en [4]. En este estudio se llegó a la conclusión de que el ciclo combinado aun teniendo mayor eficiencia de conversión solar-eléctrica es más caro que un único ciclo Rankine siendo este más simple y menos eficiente. Aunque esta diferencia en coste se hace menor para potencias inferiores a 34MW. Además, el ciclo combinado se mantiene más eficiente que un único ciclo Rankine. Por esta razón, el ciclo combinado parece ser sólo atractivo para las plantas CSP muy pequeñas (por debajo de 5 MWe). Como se comenta en [1].

Sin embargo, un problema surge si queremos realizar un escalado en los ciclos de vapor. Ya que las turbinas de gas se pueden reducir bastante bien teniendo un rendimiento razonable para pequeñas potencias, pero este hecho no sucede con los ciclos de vapor Rankine. Por lo tanto, cuando se piensa de ciclos combinados muy pequeños, la aplicación de la tecnología orgánica Rankine (ORC) como el ciclo de energía de fondo debe ser considerado. Este concepto podría ser atractivo para las pequeñas CSP de recepción central instaladas en zonas donde el precio de la electricidad es elevado debido a sus características de emplazamiento o aislamiento eléctrico.

3. Ciclos orgánicos Rankine

3.1. Introducción sobre los ciclos ORC

Los ciclos orgánicos Rankine también denominados ORC son ciclos que permiten transformar energía térmica en trabajo. Los componentes que forman el ciclo ORC son los mismos que en un ciclo Rankine de vapor de agua. Estos ciclos se caracterizan por utilizar fluidos orgánicos como fluido de trabajo para el ciclo termodinámico.

Utilizar fluidos orgánicos en vez de agua proporciona una serie de ventajas:

- Temperatura y presión crítica reducidas: por ello se utiliza en diferentes aplicaciones en las que la temperatura del foco caliente es baja.
- Presión de condensación a temperatura ambiente superior a la atmosférica: evitando la entrada de aire al circuito
- Presión de evaporación inferior que en los ciclos Rankine de agua: disminuyendo el coste debido a una menor complejidad
- Posibilidad de trabajar con ciclos pequeños (<1MW) utilizando microturbinas

También surgen una serie de inconvenientes:

- El calor latente de los fluidos orgánicos es mucho menor que el del agua, se necesita un flujo masico mayor, por lo que el consumo en la bomba aumenta.
- Trabajar con fluidos orgánicos es más complejo ya que debido a sus características muchos de ellos son inflamables, tóxicos y menos estable.
- Obtener agua en la mayoría de los casos es más sencillo y con menor coste económico que los fluidos orgánicos.
- Para temperaturas elevadas es más eficiente el uso de agua

Los ciclos ORC son utilizados en aplicaciones en las temperaturas del foco caliente no son muy elevadas. Actualmente, el interés en la recuperación de calor está creciendo, además de por razones económicas, por la creciente tendencia hacia la preocupación por el medio ambiente y las nuevas restricciones e incentivos económicos. Por ello en su mayoría se utilizan para aplicaciones de aprovechamiento de calor residual o como ciclos de baja en diferentes configuraciones de ciclos combinados. En la industria energética estos ciclos ORC son utilizados en: geotermia, biomasa y termo solar.

3.2. Fluidos orgánicos como fluido de trabajo y sus características

La utilización de fluidos orgánicos proporciona una serie de ventajas y desventajas debido a las características intrínsecas del propio fluido.

La selección del fluido de trabajo es crítica para lograr de alta eficiencia térmica. El fluido orgánico de trabajo debe ser cuidadosamente seleccionados en base a la seguridad y la viabilidad técnica. Hay una amplia selección de fluidos orgánicos que podría utilizarse en aplicaciones de ORC. Algunas características importantes de un buen fluido orgánico de

trabajo son: baja toxicidad, buena compatibilidad de materiales, límites de estabilidad de los fluidos y las características de baja inflamabilidad, corrosión e incrustaciones.

A continuación, se explican las características de los fluidos orgánicos que permiten dividirlos en diferentes subgrupos, así como una serie de características a tener en cuenta para llevar a cabo una buena selección.

3.2.1. Distinción entre Fluido seco, isoentrópico, fluido húmedo

Una de las principales características que deben ser consideradas durante la selección de un fluido orgánico es su curva de vapor de saturación. Esta característica afecta a la aplicabilidad del fluido, la eficiencia del ciclo y la disposición del equipo asociado en un sistema de generación de energía. La pendiente de la curva de saturación en el diagrama T-s depende del tipo de fluido empleado.

- Un fluido seco tiene una pendiente positiva.
- Un fluido húmedo tiene una pendiente negativa.
- Un fluido isoentrópico tiene pendientes infinitamente grandes.

Los fluidos secos e isoentrópicos muestran mejores eficiencias térmicas porque no se condensan después de que el fluido atraviesa la turbina, a diferencia de los fluidos húmedos que producen condensados después de la turbina [11]. La comparación del diagrama de temperatura-entropía para los fluidos secos, húmedos e isoentrópicos se presenta en la Ilustración 14.

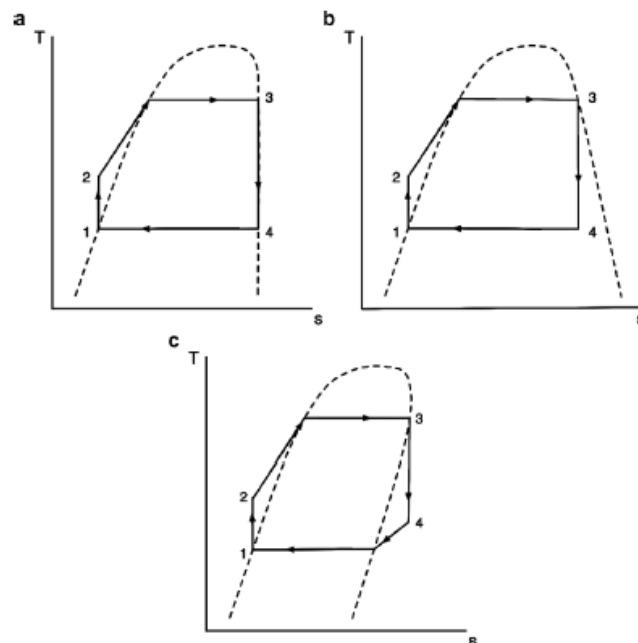


Ilustración 14 - Diagrama T-s; a (fluido isoentrópico), b (fluido húmedo), c (fluido seco)

3.2.2. Diferentes formas de trabajar con fluidos orgánicos

Tanto con fluidos orgánicos como con diferentes fluidos existen dos formas de trabajar: subcrítico y transcrito.

- En el subcrítico sin recalentamiento, el fluido de trabajo se expande una vez que se produce su cambio de fase en el evaporador trabajando con fase vapor únicamente en la turbina.
- En el ciclo subcrítico sobrecalentado, el fluido de trabajo se recalienta en el recalentador después del cambio de fase en el evaporador antes de entrar en la turbina.
- En el transcrito el fluido de trabajo del ciclo permanece como un fluido supercrítico homogéneo a lo largo de la parte del ciclo donde la presión de trabajo es superior a la presión crítica. A medida que la presión se reduce durante la expansión en la turbina, el fluido de trabajo sale de la turbina a la presión subcrítica y sufre un cambio de fase en el condensador.

A continuación, se muestra en la Ilustración 15 las diferentes formas de operar, donde se puede observar todo lo expuesto anteriormente. Sabiendo que las campanas de vapor que aparecen en la imagen se corresponden a las de un fluido seco.

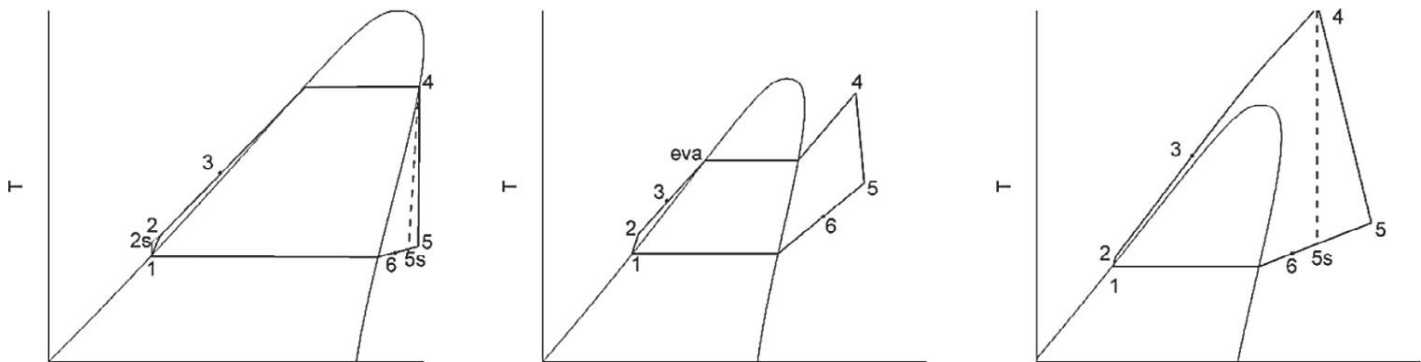


Ilustración 15 Diagrama T-s ; Subcrítico sin recalentamiento, Subcrítico con recalentamiento, Transcrito [20]

3.2.3. Temperatura crítica y máxima de trabajo

Se deben determinar los límites de presión y temperatura del ciclo. Como la relación de presión más alta conduce a una mayor eficiencia, preferimos expandirnos cada vez más los límites de presión del ciclo, pero siempre hay algunas limitaciones prácticas. La presión cercana a la crítica, los pequeños cambios de temperatura son equivalentes a grandes cambios de presión que hacen que el sistema sea inestable. Por lo tanto, una distancia razonable entre el límite superior del ciclo y el punto crítico del fluido debe ser considerado.

De ahí surge en el caso de trabajar en subcrítico sin recalentamiento que hay que diferenciar dos temperaturas.

- Temperatura máxima de trabajo es la temperatura que marca el punto más alto de la campana de vapor que es la temperatura crítica real de cada fluido.
- Temperatura crítica de trabajo es la temperatura que marca el límite para trabajar únicamente con fase gas en la expansión.

Para hallar esta temperatura crítica hay dos métodos distintos encontrados en la bibliografía [12]. En ambos la pendiente del diagrama temperatura vs entropía se utiliza para determinar el límite superior del ciclo ORC.

- Método 1: Para evitar la presencia de líquido en cada una de las secciones de la turbina, la presión de entrada más alta de la turbina es la presión que la pendiente del diagrama de entropía de temperatura es igual al infinito en ese punto (punto "A" en la Ilustración 16).

El cálculo del límite superior de presión y temperatura del ciclo basado en este criterio muestra que para la mayoría de los fluidos se descuida una gran capacidad de producción de energía. Por ejemplo, para el R32 y el Cis-buteno, el punto "A" es 45,1°C y 44,6°C más bajo que su propia temperatura crítica, respectivamente.

- Método 2: El otro método propone aumentar el límite superior del ciclo a expensas de la presencia de gotitas de líquido en una pequeña porción del proceso de la turbina. Como se ha mostrado en la Ilustración 16, al aumentar el límite superior de presión del ciclo de Ph1 a Ph2 las gotas líquidas presentes en la turbina a través de BD. La máxima fracción de masa de líquido en este proceso pertenece al punto C. En el segundo método la máxima fracción de masa permitida del líquido a través de la turbina está restringida al uno por ciento.

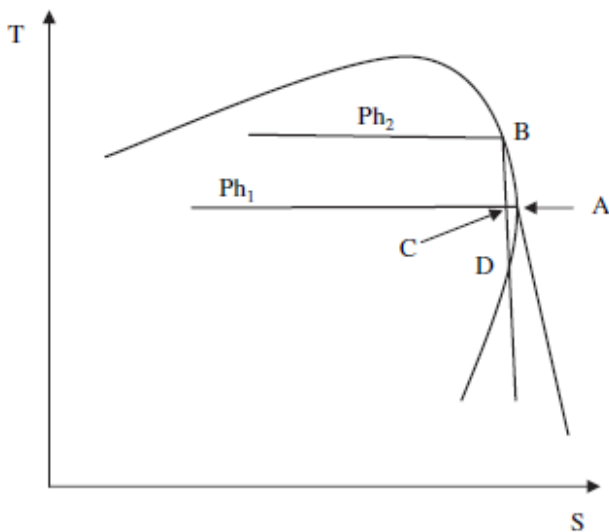


Ilustración 16 Métodos para hallar la presión y temperatura crítica

Working fluid	Alternative name(s)	P_{cr} (MPa)	T_{cr} (°C)
Acetone ²	—	4.700	234.9
Benzene	—	4.894	288.9
Butane	—	3.796	152.0
Butene	—	4.005	146.1
Perfluorobutane	C ₄ F ₁₀	2.323	113.2
Perfluoropentane	C ₅ F ₁₂	2.045	147.4
Cis-butene	—	4.225	162.6
Cyclohexane	—	4.075	280.5
Decane	—	2.103	344.5
Dodecane	—	1.817	384.9
Difluoromethane	R32, E134	4.228	147.1
Heptane	—	2.736	267.0
Hexane	—	3.034	234.7
Isobutane	—	3.64	134.7
Isobutene	—	4.010	144.9
Isohexane	—	3.040	224.5
Isopentane	—	3.396	187.2
Neopentane	—	3.196	160.6
Nonane	—	2.281	321.4
Octane	—	2.497	296.2
Pentane	—	3.370	196.5
Octafluoropropane	R218	2.640	71.9
1,1,1,2,3,3,3-Heptafluoropropane	R-227ea	2.999	102.8
1,1,1,2,3,3-Hexafluoropropane	R-236ea	3.502	139.3
1,1,1,3,3,3-Hexafluoropropane	R-236fa	3.200	124.9
1,1,2,2,3-Pentafluoropropane	R-245ca	3.925	174.42
1,1,1,3,3-Pentafluoropropane	R-245fa	3.640	154.0
1,1,1,3,3-Pentafluorobutane	R-365mfc	3.240	186.75
Octafluorocyclobutane	R-C318	2.777	115.2
Toluene	—	4.126	318.6
Trans-butene	—	4.027	155.5
R-413A ²	—	4.022	96.6
R-423A ²	—	3.563	99.1
R-426A ²	—	4.088	99.8

Ilustración 17 Presiones y temperatura críticas para distintos fluidos orgánicos

En este método, tanto para el R32 como para el Cis-buteno, el límite de presión más alto de los ciclos es 25°C más bajo que su propia temperatura crítica. Mediante el segundo método se obtuvieron estos valores de temperatura y presión crítica. Sin embargo, en los ensayos llevados a cabo en este trabajo se siguió el primer método ya que era preferible reducir un poco las

temperaturas y presiones críticas de los fluidos para únicamente tener fase gas en la expansión de la turbina.

3.2.4. Temperatura y presión en evaporador y condensador

La temperatura de condensación se decidió fijar en 25°C. Si necesario, la temperatura del condensador se eleva para hacer que la presión del condensador igual a 5 kPa, la presión más baja aceptada para el condensador.

En la siguiente tabla se muestran los límites mínimos y máximos del ciclo para cada fluido de trabajo:

Working fluid	Maximum P_{eva} (MPa)	Maximum T_{eva} (°C)	Minimum P_{con} (kPa)	Minimum T_{con} (°C)
Acetone	3.379	213	30.7	25
Benzene	4.067	274	12.7	25
Butane	3.013	138	234.7	25
Butene	2.808	125	297.2	25
C_6F_{10}	2.057	107	268.3	25
C_6F_{12}	1.803	141	84.7	25
Cis-butene	3.035	142	213.7	25
Cyclohexane	3.665	272	13.0	25
Decane	1.896	337	5.1	85
Dodecane	1.723	381	5.1	121
E134	2.747	125	212.8	25
Heptane	2.410	258	6.1	25
Hexane	2.680	226	20.2	25
Isobutane	2.890	121	350.5	25
Isobutene	2.877	125	305.0	25
Isohexane	2.682	216	28.2	25
Isopentane	2.887	177	91.8	25
Neopentane	2.788	152	171.4	25
Nonane	2.059	314	5.0	65
Octane	2.200	287	5.0	44
Pentane	2.865	186	68.3	25
R218	1.899	57	867.5	25
R-227ea	2.352	91	455.2	25
R-236ea	2.955	132	205.9	25
R-236fa	2.288	108	272.4	25
R-245ca	2.951	158	100.8	25
R-245fa	2.817	140	149.4	25
R-365mfc	2.712	177	53.4	25
R-C318	2.314	106	312.5	25
Toluene	3.576	307	5.1	31
Trans-butene	2.906	136	234.1	25
R-413A	1.839	59	720.2	25
R-423A	2.966	90	598.0	25
R-426A	1.562	55	687.8	25

Ilustración 18 temperaturas y presiones máximas y mínimas del ciclo para distintos fluidos

3.2.5. Subcategorías de los fluidos orgánicos:

De las distinta fluidos orgánicos existentes podemos encontrar una división muy general pero bastante simplificada en la que los fluidos de cada subcategoría poseen unas características muy similares entre sí. Estas subcategorías son:

- Refrigerantes: en el caso de lo refrigerantes lo más característico es su baja temperatura de evaporación y por ello son aplicados en aplicaciones en las que el foco caliente su temperatura es baja. Aunque en contraposición suelen ser menos contaminantes y menos inflamables.

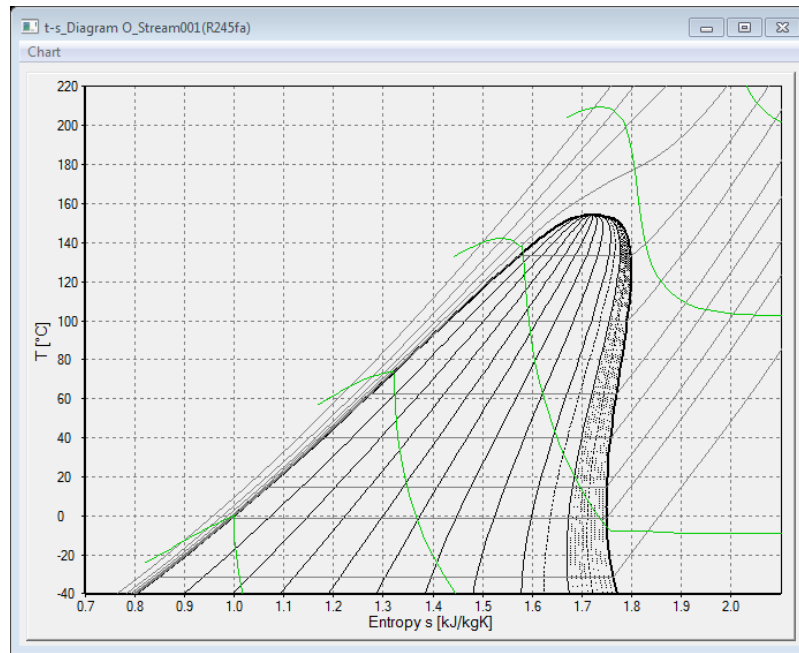


Ilustración 19 diagrama T-s del fluido orgánico 245fa

- Siloxanos: Este subgrupo engloba unas series de hidruros oligoméricos y poliméricos cuyo grupo funcional en química de organosilicio con el enlace Si – O – Si. Hay siloxanos cíclicos y lineales los cuales caracterizan por tener una temperatura de evaporación muy elevada. Aunque los rendimientos obtenidos con estas son muy bajos. [13], [14].

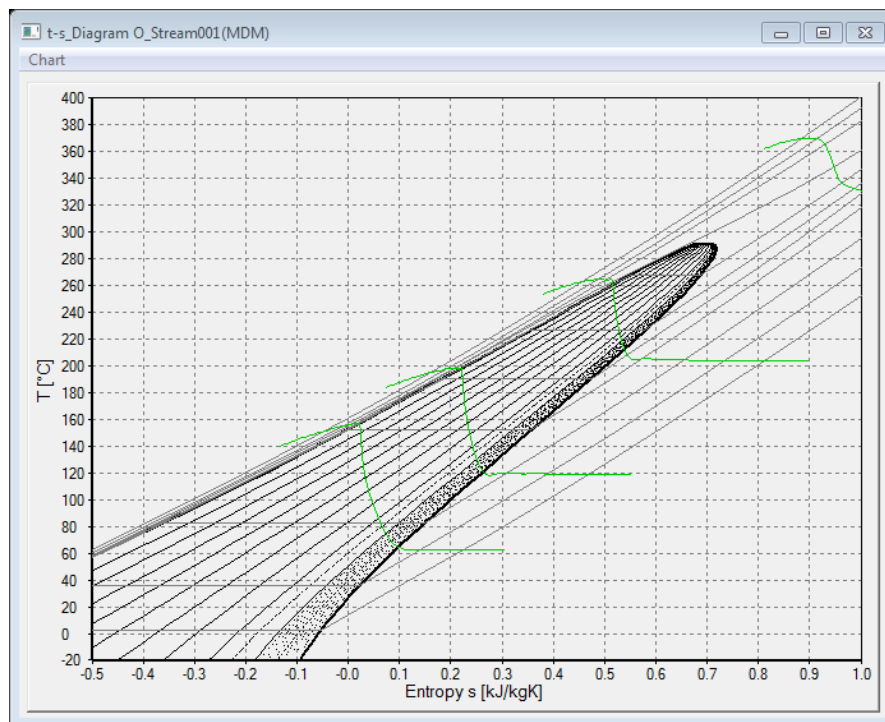


Ilustración 20 diagrama T-s del fluido orgánico MDM

- Hidrocarburos: en este subgrupo las características de los diferentes fluidos no son muy parecidas, ya que sus graficas T-s no se asemejan mucho entre ellas. Pero hay dos muy prometedores (tolueno y ciclohexano) con los que se consigue una elevada temperatura de evaporación y son de los fluidos más prometedores en cuanto a rendimiento y estabilidad. Aunque trabajar con estos fluidos es complejo ya que son inflamables.

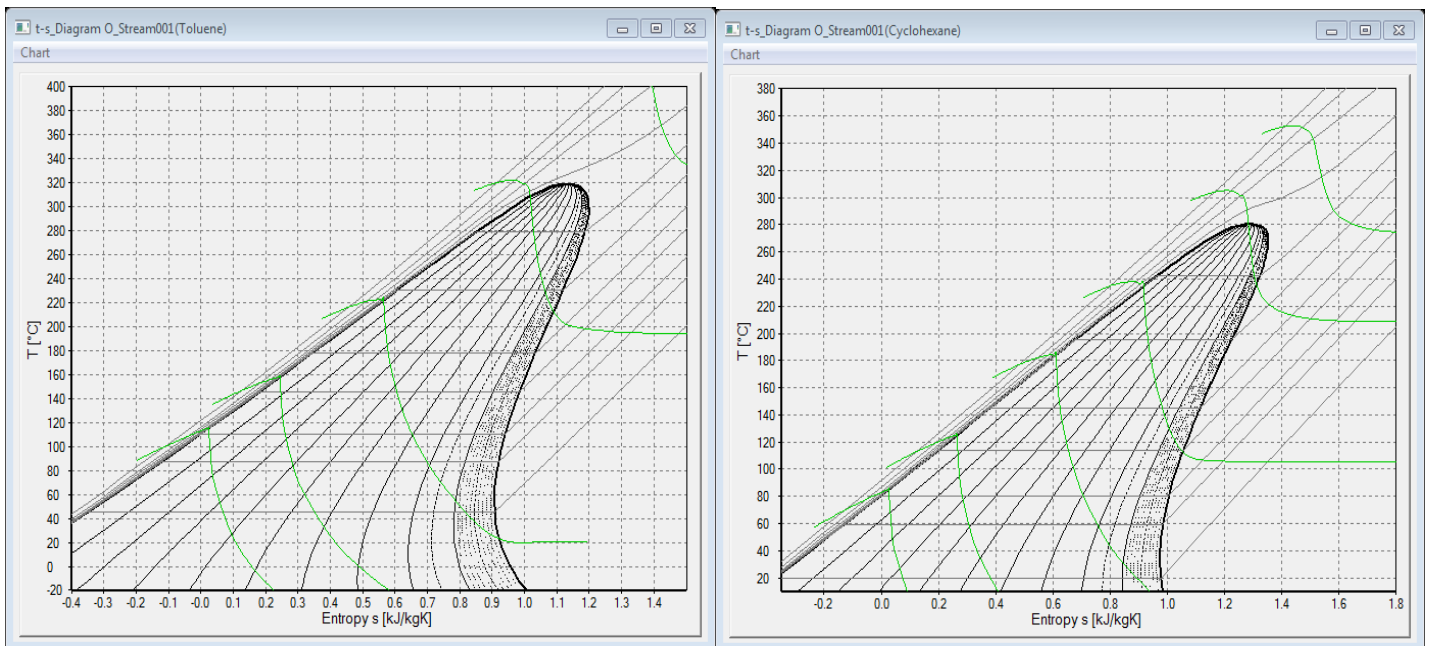


Ilustración 21 diagrama T-s de los fluidos orgánico Tolueno (izquierda) y ciclohexano (derecha)

3.3. Elección del fluido orgánico de trabajo

Después de ver las diferentes características de los fluidos orgánicos, se pasó a seleccionar los fluidos que mejores cualidades tuviesen para nuestra aplicación.

3.3.1. Posibles fluidos a elegir:

En concreto debido al programa que se usara en los ensayos, únicamente se tiene acceso a las propiedades de los siguientes fluidos y por consiguiente habrá que utilizar uno de ellos.

- Fluidos de IPSEpro:

Amoniaco
Butano
Buteno
Dióxido de carbono
Etanol
Isobutano
Isobuteno
Isopentano

Neopentano
Pentano
Propano
Tolueno
Ciclopropano
Ciclopentano
Ciclohexano

- Siloxanos (silicone oil):

D4, D5, D6, Octametiltrisiloxano(MDM),
MD2M, MD3M, MD4M, MM.

R142b, R143a, R152a, R227ea, R236ea, R236fa,
R245ca, R245fa (pentafluoropropane), R365mfc
(pentafluorobutane), R407C, R410A, R507A

- Refrigerantes:
R123, R1234yf, R1234ze, R124, R125, R134a,

3.3.2. Características del ciclo ORC utilizado y fluido ideal

En concreta para la aplicación expuesta en 1.2. Se ha buscado el ciclo ORC con las mejores características y el fluido orgánico de trabajo que mejor trabaje para dicha aplicación.

- El ciclo ideal para esta aplicación:

Para esta aplicación se decide trabajar en subcrítico sin recalentamiento, ya que según [12]. El proceso de absorción de calor en un ORC puede terminar en un estado de vapor saturado o en un estado de vapor sobrecalentado. Generalmente, el recalentamiento en un ORC aumenta la eficiencia térmica del ciclo de manera muy poco significativa y además disminuye la eficiencia de la exergía del ciclo. Así que no es recomendable trabajar en sobrecalentamiento a menos que para ganar más potencia a expensas de la pérdida de eficiencia. Por este motivo ya que en nuestro caso buscamos los mejores rendimientos del ciclo trabajaremos en los ensayos en subcrítico sin recalentamiento. Además, según [11] el ORC regenerativo no sólo tiene eficiencias de primera y segunda ley más altas que el ORC básico, sino que tiene una irreversibilidad menor, y un menor calor requerido para producir la misma potencia. Los fluidos orgánicos secos no necesitan ser recalentados ya que la eficiencia térmica del ciclo permanece aproximadamente constante cuando se aumenta la temperatura de entrada de la turbina. Además, el análisis de la segunda ley mostró que el sobrecalentamiento de los fluidos orgánicos aumenta la irreversibilidad y disminuye la eficiencia de la segunda ley. Por lo tanto, los fluidos orgánicos deben funcionar en condiciones de saturación para reducir la irreversibilidad total del sistema.

Para hallar las temperaturas y presiones críticas de los fluidos se decide trabajar con el método 1 explicado en 3.2.3.

En referencia a la configuración del ciclo se observado a lo largo de la bibliografía que el ciclo regenerativo es muy utilizado en los ciclos ORC. Por ello se estudiará para ver su diferencia con el ciclo simple y su posible elección.

- El fluido ideal para esta aplicación:

A parte de las características: baja toxicidad, buena compatibilidad de materiales, estabilidad del fluido, baja inflamabilidad, corrosión e incrustaciones. Se buscan las características que den una mejor respuesta a la aplicación planteada con un alto rendimiento y sin tener en cuenta ganar más potencia. Por ello el fluido orgánico ideal tendría que ser un fluido seco con la temperatura y presión crítica lo más elevadas posibles y una temperatura de ebullición elevada como se expone en [11].

3.3.3. Conclusión sobre los fluidos a estudiar

Después de observar las propiedades de los diversos fluidos y hacer unas pequeñas pruebas preliminares para determinar su comportamiento en cuanto a rendimiento se refiere. Se acabo decidiendo que los ensayos posteriores se realizarían con ciclohexano y tolueno.

Esta selección de fluidos se corrobora con otros artículos como [15] en el que prima alcanzar un rendimiento alto del ciclo y la fuente de calor es de unas temperaturas(>250°C) por lo que se necesitan temperaturas y presiones críticas de los fluidos.

También se corrobora esta selección con otro artículo [16] en el que el tolueno alcanza el mejor rendimiento y tecno económicamente el ciclohexano es uno de los fluidos prometedores. Igual que en [12], en el que el principal criterio para seleccionar un fluido de trabajo fue la eficiencia térmica/exergía y el ciclohexano fue seleccionado como fluido de trabajo para temperaturas elevadas.

	Tolueno	Agua	Ciclohexano
Formula	$C_6H_5CH_3$	H_2O	C_6H_{12}
Masa molecular(kg/mol)	0,092	0,018	0,084
Temperatura critica (°C)	307,46	373,95	270
Presión critica (bar)	35,6	220,64	35,77
Boiling Point (°C)	110,7	100	81
Entalpía de vaporización (kJ/kg)	365	2257,5	381

Tabla 1 Propiedades básicas de distintos fluidos

En la Tabla 1 se exponen las propiedades básicas de los fluidos que intervendrán en los posteriores ensayos. Cabe recalcar que estos fluidos son bastante inflamables lo que dificulta su manejo y complica su uso en esta aplicación. Pero se escogen son con diferencia mucho mejores que los demás fluidos en cuanto a rendimiento obtenido en un ciclo ORC.

3.4. Modelado del ciclo ORC

En este apartado se expondrá como se ha modelado el ciclo con sus diferentes variantes y posibles configuraciones.

3.4.1. Programa IPSEpro

Para modelar y simular los ciclos ORC se utilizó el programa (IPSEpro = Integrated Process Simulation Environment). Es un programa bastante completo, ya que en él se pueden hacer simulaciones con una gran variedad de fluidos. También permite combinar varios fluidos en una misma simulación.

Con este programa se pueden modelar todas las partes de un ciclo termodinámico, pudiendo llegar a simulaciones muy parejas a la realidad y con la posibilidad también de idealizar algunos parámetros.

El manejo del mismo es bastante intuitivo ya que la construcción de los ciclos se realiza de forma gráfica de una manera muy cómoda. Para llevar a cabo las simulaciones es necesario fijar los parámetros necesarios que caracterizan al ciclo. Esta tarea ya es más tediosa ya que para obtener unas buenas simulaciones es necesario que los parámetros fijados sean los correctos. Para que el programa soluciones los ciclos es necesario que el número de variables sea igual al número de parámetro fijados.

Una vez que todo está bien modelado y los parámetros fijados el programa soluciona y proporciona el flujo masico, presión, temperatura y entalpia de los distintos puntos que compongan el ciclo.

Con ellos se pueden llevar a cabo cálculos del ciclo completo en el propio programa y de manera automatizada que permiten visualizar de manera rápida distintos aspectos del ciclo. El problema de este programa es que no se programar para que saque resultados en un rango determinado de un parámetro, lo que hace que haya que realizarlo de manera manual. Los resultados es necesario exportarlos de manera manual ya que este programa no guarda los resultados anteriores, por ello está muy bien para rápidas visualizaciones, pero para realizar baterías de ensayos variando un parámetro se vuelve bastante laborioso.

3.4.2. Modelado del ciclo ORC simple

Para modelar los ciclos primero se construyeron estos mismos con los distintos componentes que lo forman. Como ya se ha comentado anteriormente esto se realizó de manera gráfica lo que facilitaba su modelado.

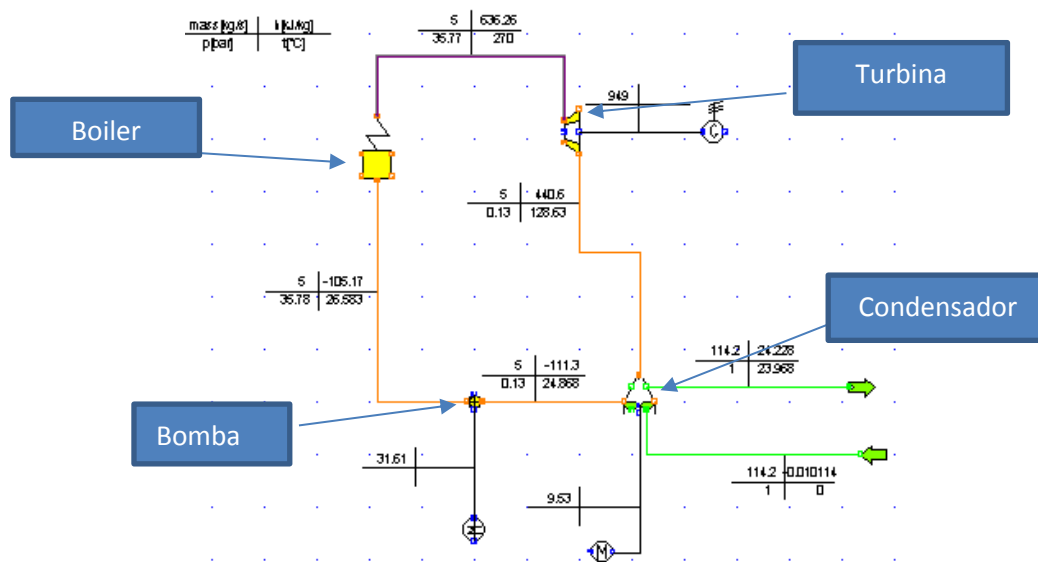


Ilustración 22 ciclo ORC simple

Los componentes principales de los ciclos serían los expuestos en Ilustración 22 y la función de cada una ya fue explicada en 2.3.2. A parte de los componentes principales estos se conectaron como se puede apreciar, asemejándose a las tuberías del circuito, idealizando las pérdidas de carga que se producen en las tuberías. También se colocaron un generador para transformar la potencia motriz de la turbina en potencia eléctrica y dos motores que suministran potencia eléctrica al condensador de aire y a la bomba.

Los parámetros fijados en el ciclo ORC:

Los parámetros de los componentes de ciclo quedan fijados, para ello se han cogido valores de componentes de otros artículos [15] [17] [4]. Los cuales estudiaban potencias semejantes y aplicaciones muy parecidas.

Parámetros (unidad)	valor
Eficiencia isoentrópica de la bomba (-)	0,8
Eficiencia mecánica de la bomba (-)	0,97
Eficiencia isoentrópica de la turbina (-)	0,87
Eficiencia mecánica de la turbina (-)	0,97
Eficiencia del generador (-)	0,97

Tabla 2 Parámetros de los componentes del ciclo ORC

Para obtener buenos resultados y llevar a cabo un buen modelado del ciclo ORC simple se fijan los siguientes parámetros:

- Presión y temperatura de entrada a la turbina.
- Presión de salida de la turbina.
- Temperatura de ambiente o de entrada del aire al condensador.
- 20°C de diferencia de temperaturas entre entrada y salida de aire del condensador.
- Presión atmosférica del aire de entrada al condensador.

El valor de flujo másico se estimó manualmente para obtener una potencia eléctrica generada de entre 1 y 0.5 MW. Dentro de ese rango se buscó el valor que optimizase el rendimiento global del ciclo ORC.

Otro parámetro necesario de fijar fue el las pérdidas de presión en el lado frio del intercambiado de aire. Estas pérdidas no eran muy significativas, pero si necesarias para completar el modelado. Se determino fijarlas en 0.01 bar después de observar los valores propuestos en los artículos [18] , [19].

Diferentes posibilidades llevadas a cabo en el modelado todas validas:

- El boiler o fuente de calor se modelo de dos formas distintas: 1) que es como se aprecia en la Ilustración 22, mediante un componente que se encarga de suministrar la potencia térmica necesaria para el ciclo .2) Mediante un intercambiado de calor como se puede apreciar en la
-
- Ilustración 23. Esta opción se asemeja más a la realidad, además de que nos permite sacar un dato que a priori es relevante para próximos ensayos como ciclo de baja en un ciclo combinado. Que es la potencia neta especifica (kWe/(kg/s), la cual se refiere a la potencia que el ciclo es capaz de generar partido del flujo masico que entra en el intercambiado.

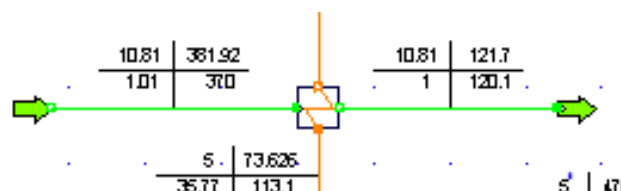


Ilustración 23 evaporador real

- El condensador también se modelo de dos formas distintas:1) que es como se aprecia en la Ilustración 22, con un condensador de aire .2) mediante un condensador de agua

como se puede apreciar en la ilustración. Aunque con el condensador de agua se iban a conseguir mejores resultados en cuanto a rendimiento se refiere, esta posibilidad no se estudió a fondo ya que la aplicación para la que está pensado el ciclo no hay posibilidad de utilizar agua.

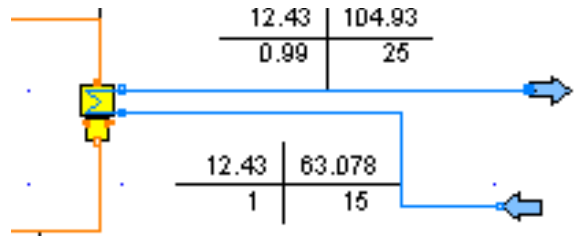


Ilustración 24 Condensador de agua

3.4.3. Modelado del ciclo ORC regenerativo

A parte de las diferentes posibilidades de modelado expuestas anteriormente, hay otra posibilidad de modelado que se ha tenido en consideración. En concreto es la de incluir un recuperador de calor que realizase un intercambio entre los fluidos de salida de la turbina y los de la entrada al boiler/evaporador. Esto se decidió estudiar ya que en distintos artículos se hablaba sobre ello. En concreto en [15] la aplicación es muy similar y los resultados los obtuvieron con ciclo ORC regenerativo. En el caso de [20] Los resultados muestran que la adición de la regeneración al ciclo de trabajo no cambia la salida específica de la red. Sin embargo, la regeneración disminuye la diferencia en la eficiencia térmica de los diferentes fluidos de trabajo. En los resultados se observa que la incorporación de la regeneración mejora el rendimiento global del ciclo. Además, la mejora de rendimiento con respecto al ciclo simple se ve acrecentada con la temperatura máxima del ciclo. Esto mismo también sucede en [21] cómo se puede observar en la Ilustración 25. También se expone en [22], en el cual aparte de incluir un eyector en el ciclo ORC, los resultados obtenidos con ciclos regenerativos son mejores en cuanto a rendimiento que los ciclos simples.

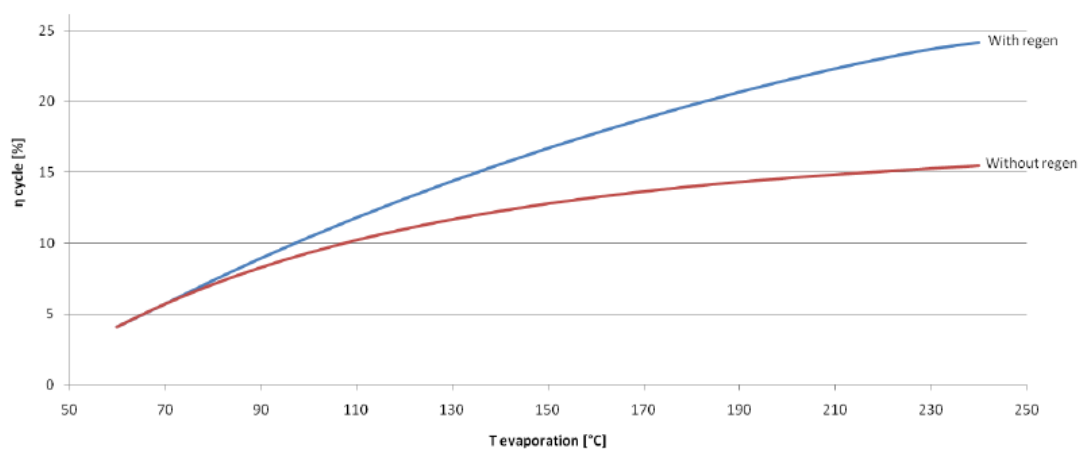


Ilustración 25 Comparación entre ciclo ORC simple y regenerativo [21]

Para llevar a cabo el modelado del ciclo regenerativo todo el modelado fue igual que lo expuesto anteriormente en modelado del ciclo simple. Solo que también se incluyó un intercambiado de calor entre el fluido de la salida de la turbina y el fluido de la salida de la bomba, como se puede observar en Ilustración 26. Era necesario fijar un parámetro en el intercambiador para poder realizar los ensayos. Se tomó la decisión de fijar el valor de (coeficiente de transferencia de calor por área de transferencia) en vez de fijar unas

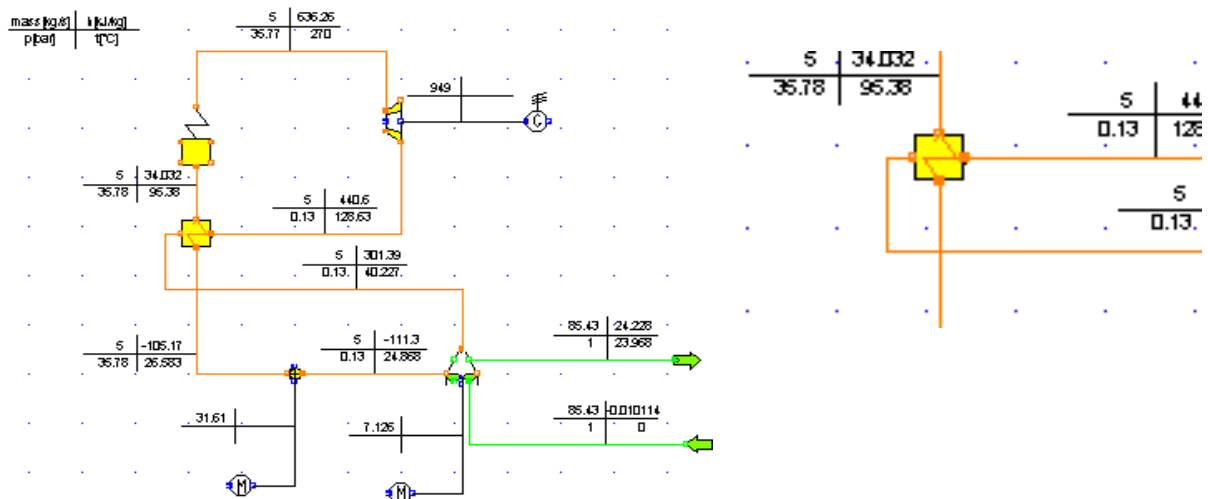


Ilustración 26 ciclo ORC regenerativo con detalle del intercambiador

diferencias de temperatura entre la entrada y la salida. Esto se realizó para asegurarse de que el intercambiador funcionase en todos los rangos de ensayo, así como que sufriese una sobredimensión que acarrearase un sobrecoste a posteriori.

3.5. Ensayos, resultados sobre los ciclos ORC

En este apartado se expondrán los diferentes ensayos que fueron llevado a cabo, los resultados obtenidos en esos ensayos, así como unas conclusiones acerca de eso resultados obtenidos. El objetivo de estos ensayos era caracterizar los diferentes ciclos y obtener valores de los ciclos que nos permitieran seleccionar el fluido a utilizar.

3.5.1. Ensayos del ciclo ORC

Para realizar los ensayos en primer lugar partíamos de que teníamos cuatro ciclos distintos los cuales iban a ser caracterizados:

- Ciclo ORC simple de tolueno
- Ciclo ORC simple de ciclohexano
- Ciclo ORC regenerativo de tolueno
- Ciclo ORC regenerativo de ciclohexano

Para todos estos ciclos se realizarían ensayos a distintas temperaturas ambiente, lo que influiría en la temperatura de entrada de aire al condensador. Por ello para una buena caracterización se llevaron a cabo ensayos con temperaturas ambiente de (0,10,20,30,40) °C. Para cumplir con la diferencia de temperatura de 20 °C entre la entrada y la salida del aire del condensador, como fue estipulado en el modelado. Se debía de cambiar la presión de salida de

la turbina con los valores que aparecen en la Tabla 3 para mantener esa diferencia de temperatura.

Temperatura Ambiente (°C)	Presión de salida de la turbina (bar)	
	Ciclohexano	Tolueno
0	0,13	0,051
10	0,163	0,051
20	0,248	0,079
30	0,365	0,1235
40	0,521	0,1858

Tabla 3 Valores de presión de la salida de la turbina

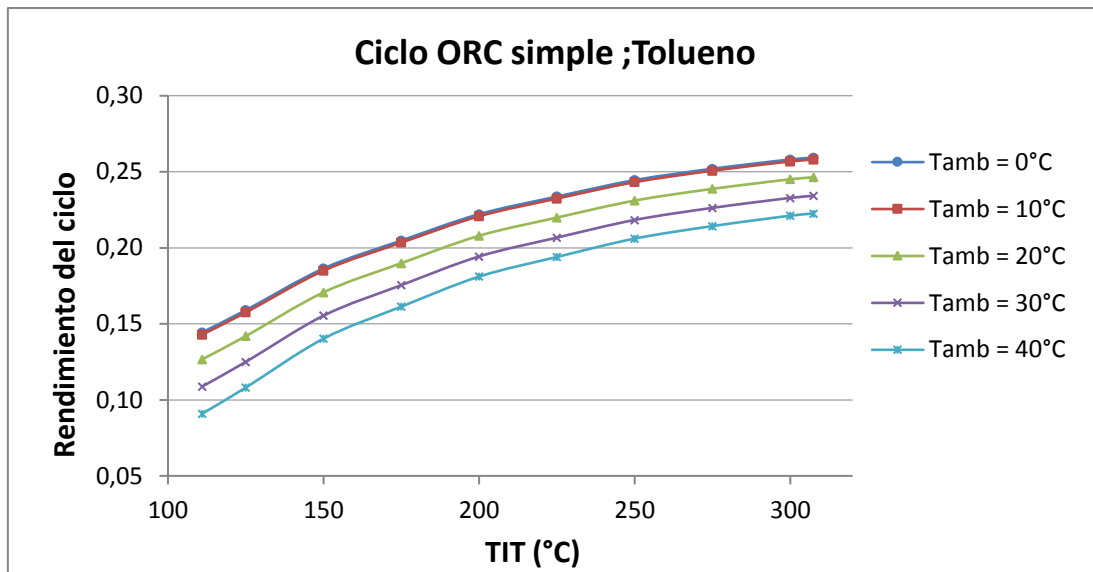
Para llevar a cabo una buena caracterización del ciclo se fue variando los valores de presión y temperatura a la salida del evaporador o entrada de la turbina. Esto se fue realizando desde la presión y temperatura crítica, explicado en 3.2.3, de cada fluido hasta una temperatura de 125 °C. Siempre entrando en la turbina como vapor saturado como ya se explicó en 3.2.2. Estos valores utilizados se pueden ver en la Tabla 4.

Ciclohexano		Tolueno	
temperatura(°C)	presión(bar)	temperatura(°C)	presión(bar)
		307,46	35,6
		300	32,5
270	35,77	275	23
250	27,6	250	16,5
225	19,6	225	11
200	13,4	200	7,5
175	8,8	175	4,5
150	5,5	150	2,75
125	3,2	125	1,4

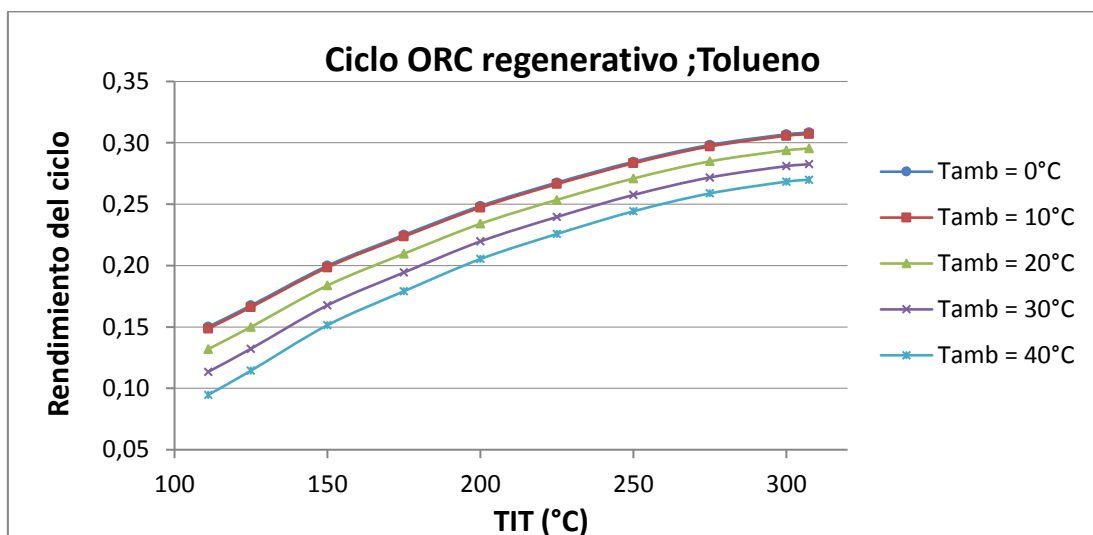
Tabla 4 Valores de presión y temperatura a la salida a la entrada de la turbina

3.5.2. Resultados obtenidos

En este apartado se exponen los diferentes resultados obtenido debido a los distintos ensayos expuestos en 3.5.1.

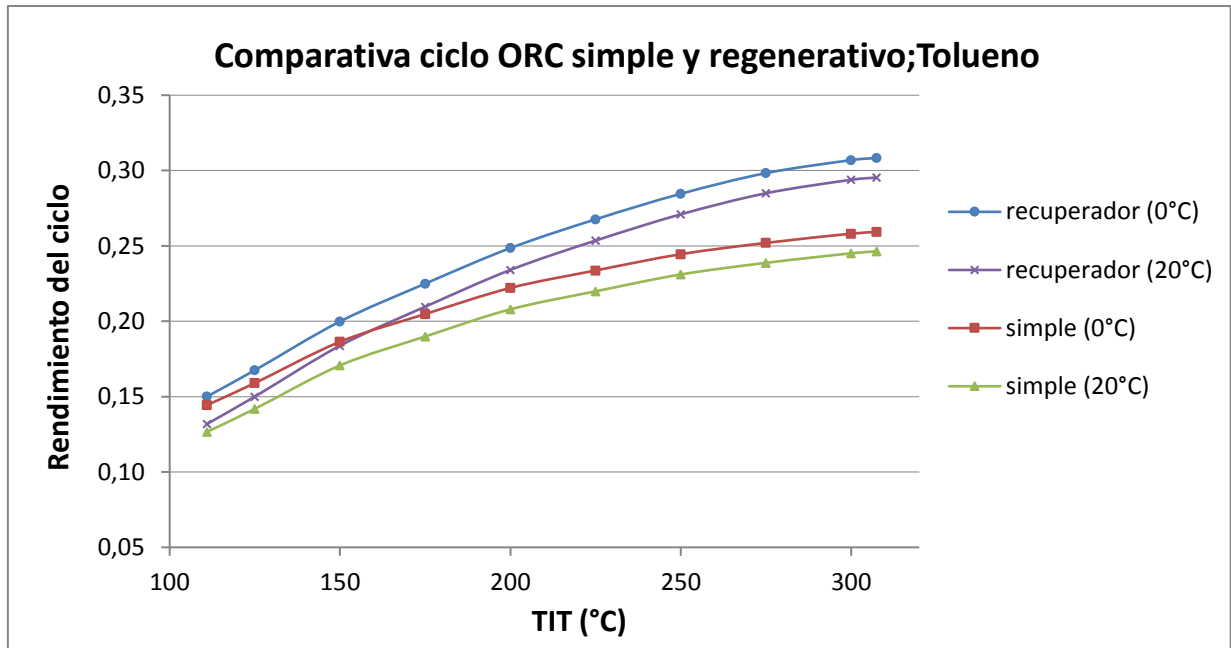


Gráfica 1 Ciclo ORC simple; Tolueno



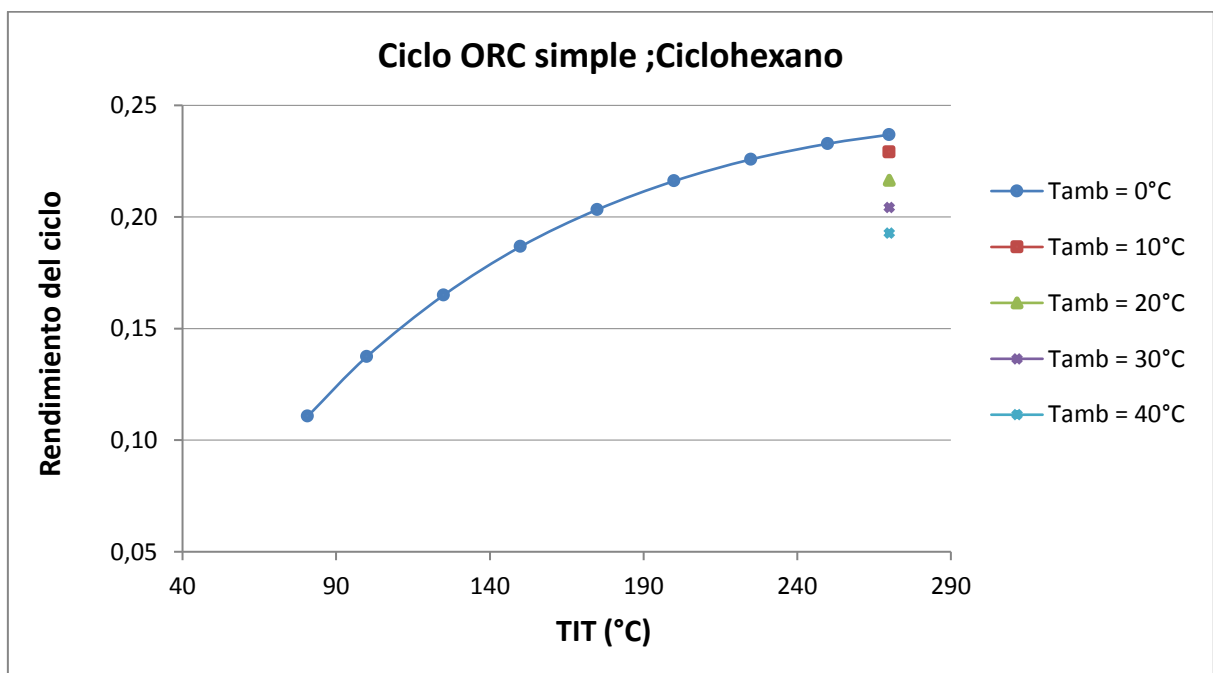
Gráfica 2 Ciclo ORC regenerativo; Tolueno

Viendo los resultados de las Gráfica 1 y Gráfica 2 se observa bastante uniformidad, como era de esperar el rendimiento disminuía al aumentar la temperatura ambiente. También se observa como en ambas graficas el rendimiento aumenta con la TIT, llegando al máximo con el valor de temperatura crítica.



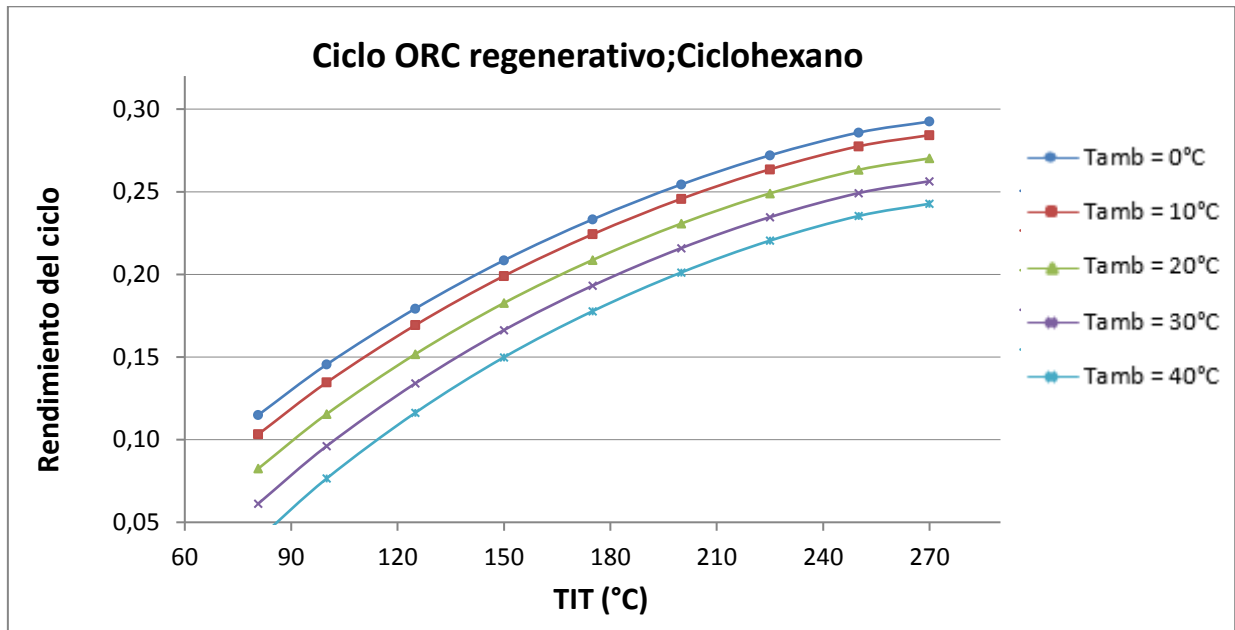
Gráfica 3 Comparativa ciclo ORC simple y regenerativo; Tolueno

Como se puede ver en la Gráfica 3 únicamente se ha expuesto la comparativa de 0°C y 20°C, ya que era una muestra representativa de la realidad porque las demás temperaturas ambiente tenían el mismo comportamiento. En cuanto a los resultados se puede observar que a bajas TIT el rendimiento entre el ciclo simple y el regenerativo no difiere mucho. Aunque a medida que se aumenta el TIT la diferencia aumenta, llegando hasta una variación de un 5% a temperatura crítica.



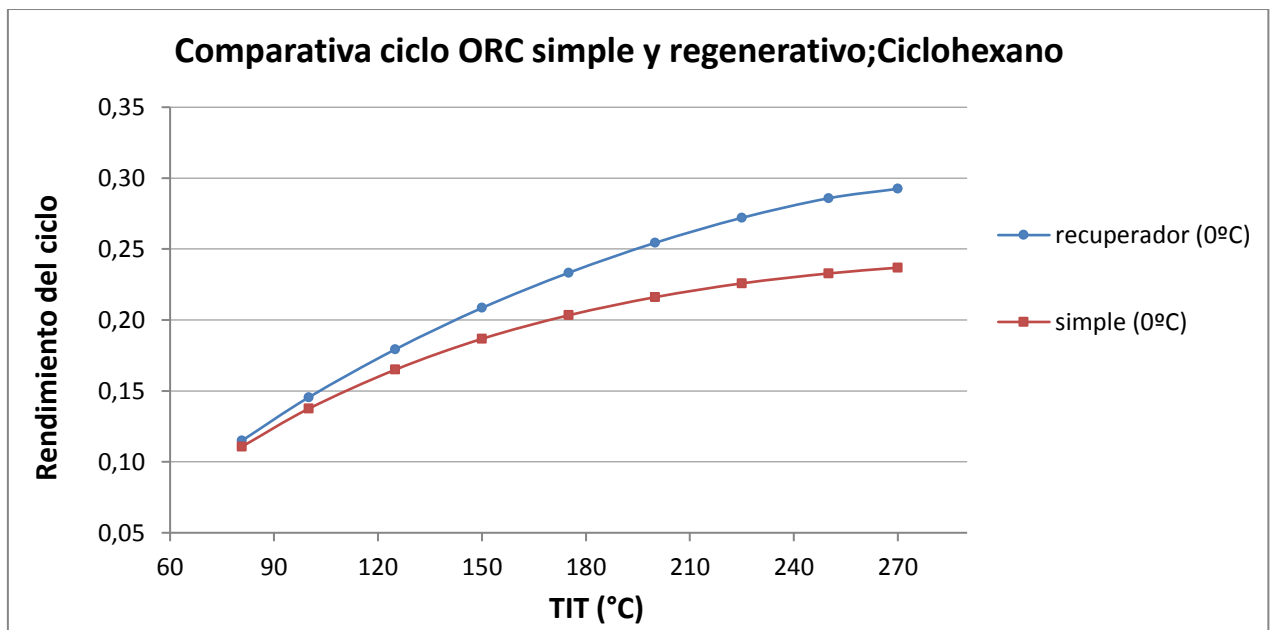
Gráfica 4 Ciclo ORC simple; Ciclohexano

En función de los resultados obtenidos por el Tolueno y visto el primer resultado del ciclo simple de ciclohexano se tomó la decisión de obtener únicamente los valores para temperatura ambiente de 0°C en el caso del ciclo ORC simple de ciclohexano.



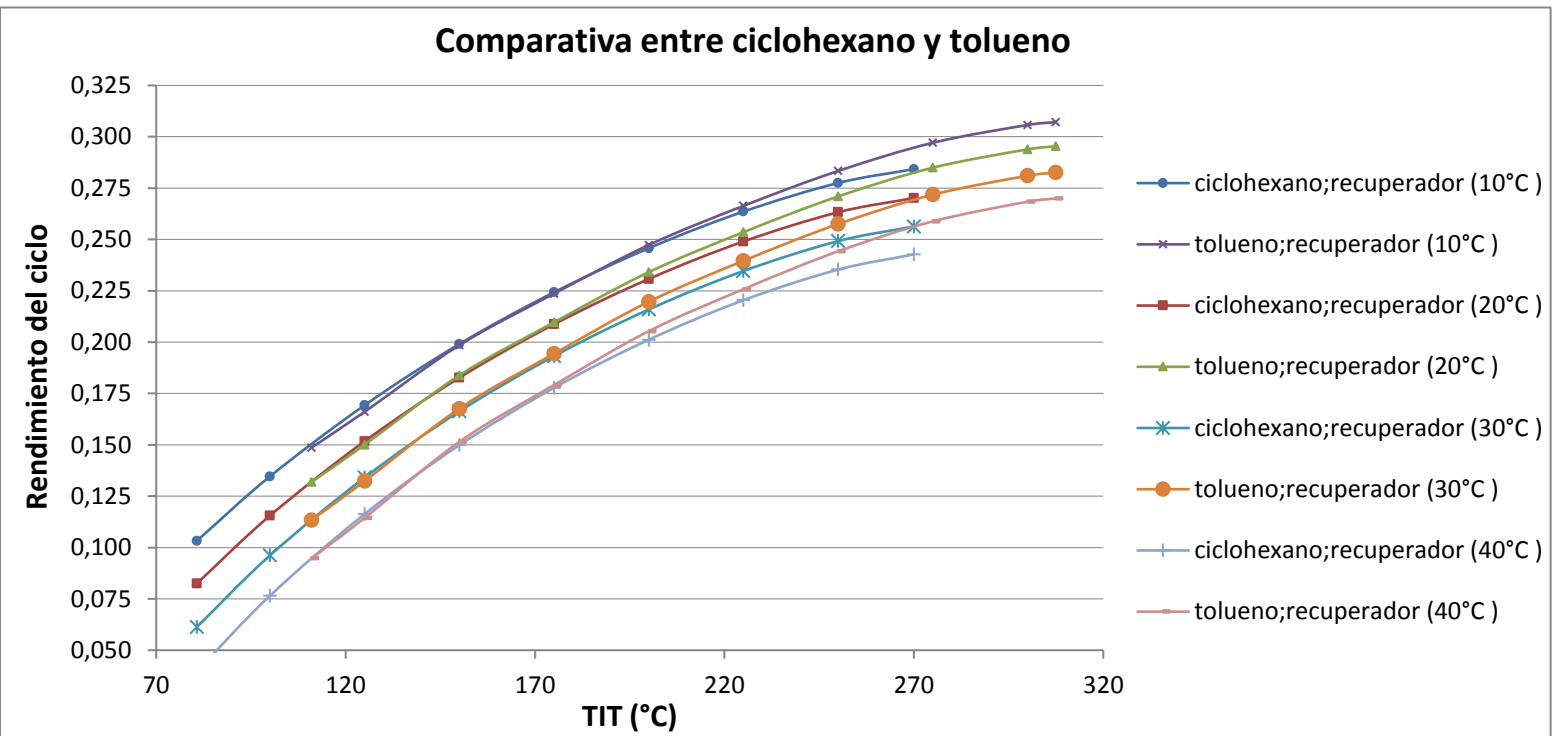
Gráfica 5 Ciclo ORC regenerativo; Ciclohexano

Viendo los resultados de las Gráfica 4 y Gráfica 5 se observa que el rendimiento disminuía al aumentar la temperatura ambiente. También se observa como en ambas graficas el rendimiento aumenta con la TIT, llegando al máximo con el valor de temperatura crítica.

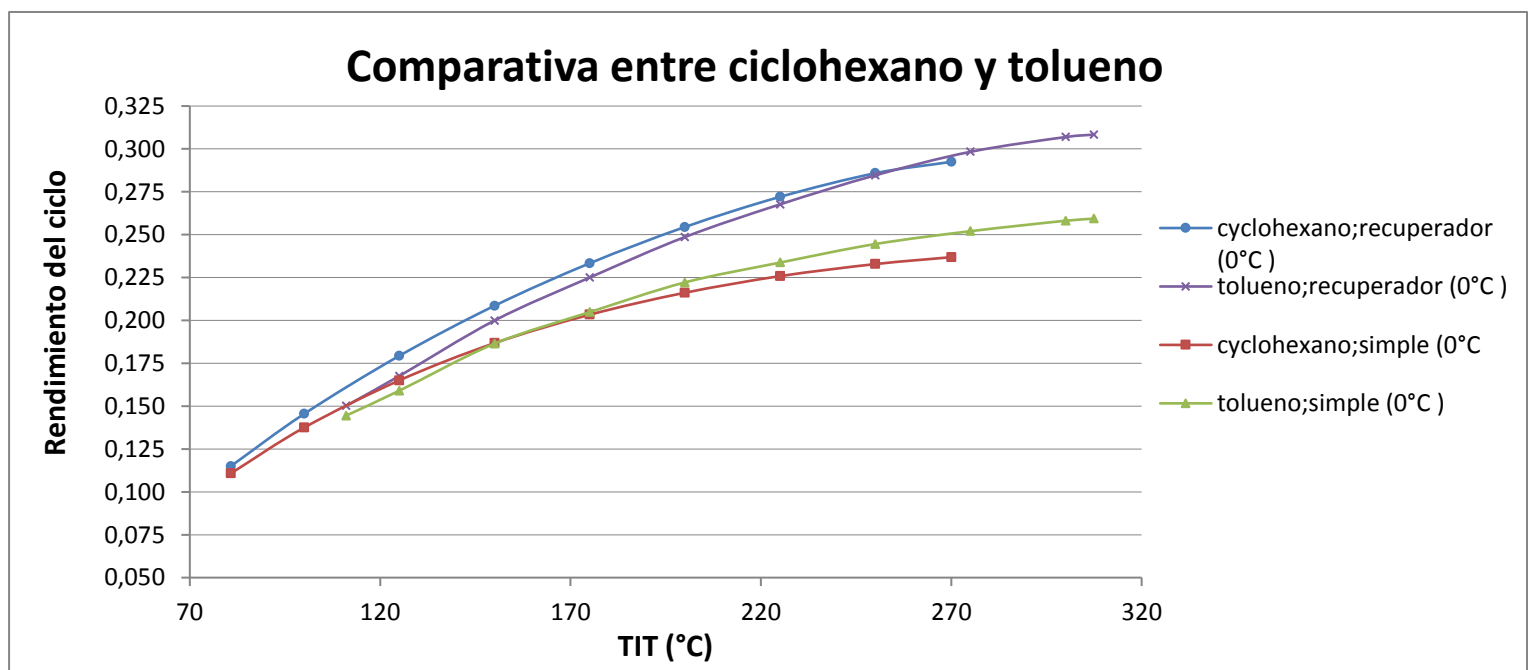


Gráfica 6 Comparativa ciclo ORC simple y regenerativo; Ciclohexano

Como se puede ver en la Gráfica 6 únicamente se ha expuesto la comparativa de 0°C, ya que era una muestra representativa de la realidad porque las demás temperaturas ambiente tenían el mismo comportamiento. En cuanto a los resultados se puede observar que a bajas TIT el rendimiento entre el ciclo simple y el regenerativo no difiere mucho. Aunque a medida que se aumenta el TIT la diferencia aumenta, llegando hasta una variación de un 5.5% a temperatura crítica.



Gráfica 7 Comparativa entre ciclohexano y tolueno



Gráfica 8 Comparativa entre ciclohexano y tolueno

En la Gráfica 7 y Gráfica 8 se compara los resultados obtenidos con el tolueno con los obtenidos con el ciclohexano. En la Gráfica 8 se compara tanto el ciclo simple como el regenerativo. El caso del simple el tolueno tiene mejor rendimiento excepto a TIT bajos. El caso del regenerativo a 0°C el ciclohexano tiene prácticamente mejor rendimiento en todo el rango de TIT, excepto a calores de TIT altos. Este hecho como se puede ver en la Gráfica 7 se repite solo que al aumentar la temperatura ambiente el rango de TIT donde el ciclohexano tiene mayor rendimiento se va reduciendo. Llegando ala caso de 40°C donde el tolueno produce mayor rendimiento en todo el rango de TIT.

4. Conclusiones

En este apartado se expondrán tanto las conclusiones generales sacadas sobre los distintos ensayos realizado, así como la decisión final de la elección del fluido de trabajo.

4.1. Conclusiones generales

- En todos los ensayos realizados como era de esperar el rendimiento disminuía al aumentar la **temperatura ambiente**.
- El uso de un intercambiador de calor para recuperar el calor de la salida de la turbina e introducirlo antes de la fuente de calor, convirtiendo el **ciclo** en un **regenerativo**. Es sin lugar a duda una mejora muy considerable en cuanto a rendimiento llegando a incrementarlo un 19% para el ciclohexano y un 16% para el tolueno, trabajando con TIT de temperaturas críticas y una temperatura ambiente de 0°C.
- Con el tolueno se obtienen mejores resultados en cuanto a **rendimiento**, aunque esto no sucede en todo el rango de TIT. Por lo general para bajos valores de TIT el ciclohexano consigue mejores rendimientos y el tolueno para valores alto de TIT. Este hecho vario con la temperatura ambiente, a mayor temperatura ambiente el tolueno consigue mejores resultados en mayor rango de TIT.
- Los **valores máximos** de rendimientos para cada fluido han sido 0,3083 para el tolueno y 0.2924 para el ciclohexano

4.2. Elección del fluido de trabajo

Para tomar la decisión de cuál es el fluido más favorable para la aplicación expuesta en la sección 1.2. No nos hemos fijado únicamente en los resultados de los ensayos. Si fuese así claramente el tolueno sería el seleccionado ya que es el fluido que consigue mejores resultados en cuanto a rendimiento. También se ha tenido en cuenta el GWP de cada fluido y un indicador termo económico (LCOE). Estos valores han sido obtenidos de [16].

Si observamos los valores de GWP y LCOE que aparecen en Ilustración 27 .El ciclohexano tiene un menor GWP que el tolueno, por lo que a priori es menos contaminante. Además, el LCOE del ciclohexano es bastante inferior al del tolueno, por lo que termo económicamente es más rentable.

También hay que tener en cuenta que para la aplicación estos fluidos trabajaran en casi todo momento en valores de TIT elevados y para esto valores el tolueno obtiene mejores rendimientos.

Working fluid	GWP (100 yrs)	P_{crit} (MPa)	T_{crit} (°C)	P_{eva} (MPa)	P_{cond} (MPa)	T_{cond} (°C)	Actual LCOE (\$/kWh)
R113	6,130	3.392	214.1	2.839	0.0929	45	0.344
Water	0.2	22.06	374.0	4.0	0.0096	45	0.353
Isohexane	Very low	3.04	224.6	2.308	0.0608	45	0.364
Cyclohexane	Very low	4.075	280.5	3.229	0.0300	45	0.369
Benzene	Very low	4.894	288.9	3.583	0.0298	45	0.374
Hexane	3.1	3.034	234.7	2.308	0.0451	45	0.376
OMTS	0	1.415	290.9	0.882	0.0050	66.6*	0.396
HMDS	0	1.939	245.6	1.186	0.0142	45	0.396
Pentane	2	3.37	196.6	2.45	0.1361	45	0.410
Heptane	3	2.736	267.0	2.087	0.0153	45	0.434
Toluene	3.3	4.126	318.6	3.154	0.0099	45	0.473
R245fa	1,030	3.651	154.0	2.128	0.2945	45	0.476

Ilustración 27 GWP y LCOE de distintos fluidos

Teniendo en cuenta todo lo nombrado a lo largo de este apartado el ciclohexano fue el seleccionado como fluido de trabajo más favorable para la aplicación expuesta.

5. Bibliografía

- [1] F. Zaversky, I. Les, M. Sánchez, B. Valentin, J.-F. Brau, F. Siros, J. McGuire y F. Berard, «Techno-Economic Optimization and Benchmarking of a Solar-Only Powered Combined Cycle with High-Temperature TES Upstream the Gas Turbine,» *In Green Energy and Environment. London, UK: IntechOpen Limited*, 2019.
- [2] F. Zaversky, L. Aldaz, M. Sánchez, J. Fernández-Reche, A. Füssel y J. Adler, «Experimental and numerical evaluation of a small array of ceramic foam volumetric absorbers,» *AIP Conference Proceedings*, vol. 2126, p. 030066, 2019.
- [3] F. Zaversky, L. Aldaz, M. Sánchez, A. L. Ávila-Marín, M. I. Roldán, J. Fernández-Reche, A. Füssel, W. Beckert y J. Adler, «Numerical and experimental evaluation and optimization of ceramic foam as solar absorber – Single-layer vs multi-layer configurations,» *Applied Energy*, vol. 210, pp. 351-375, 2019.
- [4] F. Zaversky, I. Les, P. Sorbet, M. Sánchez, B. Valentin, J.-F. Brau y F. Siros, «The challenge of solar powered combined cycles – Providing dispatchability and increasing efficiency by integrating the open volumetric air receiver technology,» *Energy*, vol. 194, p. 116796, 2020.
- [5] A. L. Ávila-Marín, «Volumetric receivers in Solar Thermal Power Plants with Central Receiver System technology: A review,» *Solar Energy*, vol. 85, nº 5, pp. 891-910, 2011.
- [6] F. Tellez, M. Romero, P. Heller, A. Valverde, G. Dibowski y S. Ulmer, «Thermal Performance of “SolAir 3000 kWth” Ceramic Volumetric Solar Receiver,» vol. 12, 2004.
- [7] C. K. Ho, «Advances in central receivers for concentrating solar applications,» *Solar Energy*, vol. 152, pp. 38-56, 2017.
- [8] R. B. Martín, «Modelización y optimización de código para el funcionamiento de un ciclo combinado de tres niveles de presión,» 2018.
- [9] G. Pei, L. Jing y J. Jie, «Analysis of low temperature solar thermal electric generation using,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, nº 8–9, pp. 998-1004, 2010.
- [10] «PROTERMOSOLAR, Asociación Española para la Promoción de la Industria Termosolar,» Agosto 2020. [En línea]. Available: <https://www.protermosolar.com/proyectos-termosolares/mapa-de-proyectos-en-espana-4/>. [Último acceso: 1 Septiembre 2020].
- [11] P. J. Mago, L. M. Chamra, K. Srinivasan y C. Somayaji, «An examination of regenerative organic Rankine cycles using dry fluids,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 28, nº 8–9, pp. 998-1007, 2008.
- [12] R. Rayegan y Y. Tao, «A procedure to select working fluids for Solar Organic Rankine Cycles

- (ORCs),» *Renewable Energy*, vol. 36, nº 2, pp. 659-670, 2011.
- [13] J. Zhang, H. Zhang, K. Yang, F. Yang, Z. Wang, G. Zhao, H. Liu, E. Wang y B. Yao, «Performance analysis of regenerative organic Rankine cycle (RORC) using the pure working fluid and the zeotropic mixture over the whole operating range of a diesel engine,» *Energy Conversion and Management*, vol. 84, pp. 282-294, 2014.
- [14] B. Dong, G. Xu, Y. Cai y H. Li, «Analysis of zeotropic mixtures used in high-temperature Organic Rankine cycle,» *Energy Conversion and Management*, vol. 84, pp. 253-260, 2014.
- [15] R. Chacartegui, D. Sánchez, J. M. Muñoz and T. Sánchez, «Alternative ORC bottoming cycles FOR combined cycle power plants,» *Applied Energy*, vol. 86, no. 10, pp. 2162-2170, 2009.
- [16] N. B. Desai y S. Bandyopadhyay, «Thermo-economic analysis and selection of working fluid for solar organic Rankine cycle,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 95, pp. 471-481, 2016.
- [17] R. Chacartegui, D. Sánchez, F. J. Aguilar, A. Muñoz Blanco y T. Sanchez, «Analysis of Intermediate Temperature Combined Cycles With a Carbon Dioxide Topping Cycle,» *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, vol. 2, pp. 673-680, 2008.
- [18] W. Zhao, Q. Qu y Q. Li, «Numerical investigation on the flow field of an axial flow fan in a direct air-cooled condenser for a large power plant,» *Heat Transfer - Asian Research*, p. 42, 2013.
- [19] A. Conradie y D. Kröger, «Performance evaluation of dry-cooling systems for power plant applications,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 16, nº 3, pp. 219-232, 1996.
- [20] A. Javanshir, N. Sarunac y Z. Razzaghpanah, «Thermodynamic analysis of a regenerative organic Rankine cycle using dry fluids,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 123, pp. 852-864, 2017.
- [21] I. Vankeirsbilck, B. Vanslambrouck, S. Gusev y M. De Paepe, «Organic Rankine cycle as efficient alternative to steam cycle for small scale power generation,» *8th international conference on heat transfer, fluid mechanics and thermodynamics, proceedings*, pp. 785-792, 2011.
- [22] R. Kheiri, H. Ghaebi, M. Ebadollahi y H. Rostamzadeh, «Thermodynamic modeling and performance analysis of four new integrated organic Rankine cycles (A comparative study),» *Applied Thermal Engineering*, vol. 122, pp. 103-117, 2017.
- [23] W. Stein y R. Buck, «Advanced power cycles for concentrated solar power,» *Solar Energy*, vol. 152, pp. 91-105, 2017.
- [24] M. Romero, R. Buck y J. Pacheco, «An Update on Solar Central Receiver Systems, Projects and Technologies,» *Journal of Solar Energy Engineering (ASME)*, vol. 124, pp. 98-108, 2002.
- [25] S. Safarian y F. Aramoun, «Energy and exergy assessments of modified Organic Rankine

Cycles (ORCs),» *Energy Reports*, vol. 1, pp. 1-7, 2015.

- [26] A. M. Pantaleo, S. M. Camporeale, A. Sorrentino, A. Miliozzi, N. Shah y C. N. Markides, «Hybrid solar-biomass combined Brayton/organic Rankine-cycle plants integrated with thermal storage: Techno-economic feasibility in selected Mediterranean areas,» *Renewable Energy*, vol. 147, pp. 2913-2931, 2020.
- [27] J. Vivian, G. Manente y A. Lazzaretto, «A general framework to select working fluid and configuration of ORCs for low-to-medium temperature heat sources,» *Applied Energy*, vol. 156, pp. 727-746, 2015.