



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



ESCOLA TÉCNICA SUPERIOR DE
NÁUTICA E MÁQUINAS

TRABAJO DE FIN DE GRADO

“ESTUDIO ECONÓMICO DEL CICLO ORGÁNICO DE RANKINE EN UN PORTACONTENEDORES DE 6600 TEU”

GRADO EN TECNOLOGÍAS MARINAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA Y
MÁQUINAS

JULIO – 2021

AUTOR: JUAN HERBELLO MILLÁN

DIRECTOR: MANUEL ROMERO GÓMEZ

DIRECTOR: MANUEL NAVEIRO PARGA



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



ESCOLA TÉCNICA SUPERIOR DE
NÁUTICA E MÁQUINAS

TRABAJO DE FIN DE GRADO

“ESTUDIO ECONÓMICO DEL CICLO ORGÁNICO DE RANKINE EN UN PORTACONTENEDORES DE 6600 TEU”

GRADO EN “TECNOLOGÍAS MARINAS, MENCIÓN EN
ENERGÍA Y PROPULSIÓN”

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA E
MÁQUINAS

JULIO – 2021

AUTOR:

DIRECTORES:

Fdo.: MANUEL ROMERO GÓMEZ

Fdo.: JUAN HERBELLO MILLÁN Fdo.: MANUEL NAVEIRO PARGA

RESUMEN

El interés del sector marítimo en la tecnología del ciclo orgánico de Rankine (ORC) para el aprovechamiento del calor residual en buques es cada vez mayor debido al potencial de estos ciclos para aumentar la eficiencia de los buques y reducir sus emisiones. A pesar de que los ORC se han instalado desde hace años en el ámbito terrestre, la implementación de esta tecnología a bordo de los buques es reciente.

En este estudio se comprueba la viabilidad económica de la instalación de dos tipos de ORC, uno subcrítico y otro transcrito, en un buque portacontenedores. En primer lugar, se realiza la simulación de los ciclos propuestos y se validan los modelos termodinámicos elaborados. A continuación, se dimensionan los intercambiadores de calor y se efectúan las simulaciones de los ciclos con los intercambiadores dimensionados. Por último, se evalúa el coste de proyecto y periodo de amortización para cada uno de los ciclos. Los resultados obtenidos muestran que se puede obtener rentabilidad a medio y largo plazo y reducir el consumo de combustible de los motores auxiliares del buque entre el 60 % y 80 % aproximadamente.

RESUMO

O interese do sector marítimo na tecnoloxía do ciclo orgánico de Rankine (ORC) para o aproveitamento de calor residual nos buques é cada vez maior debido o potencial de estes ciclos para aumentar a eficiencia dos buques e reducir as súas emisión. A pesar de que os ORC instálanse utilízanse xa hai anos no ámbito terrestre, a implementación desta tecnoloxía a bordo dos buques é recente.

Neste estudo e compróbase a viabilidade económica da instalación de dous tipos de ORC, un subcrítico e outro transcrito. En primeiro lugar realízase a simulación dos ciclos propostos e válídanse os modelos termodinámicos elaborados, a continuación dimensiónanse os intercambiadores de calor dos ciclos. Por último, efectúase a simulación de deseño dos ciclos cos intercambiadores dimensionados, o estudo económico do coste de proxecto e periodo de amortización. Os resultados obtidos mostran que se pode obter rentabilidade a medio e longo prazo e xerar una redución de consumo de combustible dos os motores auxiliares de entre o 60 % e 80 % aproximadamente.

ABSTRACT

The interest of the maritime sector in organic Rankine cycle (ORC) technology for the use of waste heat in ships is increasing due to the potential of these cycles to improve the efficiency of ships and reduce their emissions. Although the ORCs have been installed on land for years, the implementation of this technology on board ships is recent.

This study verifies the economic feasibility of installing two types of ORC, one subcritical and one transcritical. First, the proposed cycles are simulated and the thermodynamic models produced are verified; then the heat exchangers of the cycles are dimensioned. Finally, the design simulation of the cycles with the dimensioned heat Exchangers, the economic study on their cost and amortization period are carried out. The results obtained show that profitability can be achieved in the medium and long-term and it is possible to reduce the fuel consumption of the auxiliary engines of the ship by between approximately 60 % and 80 %.

PALABRAS CLAVE

Ciclo Orgánico de Rankine, buque portacontenedores, calor residual, intercambiador de carcasa y tubos, estudio económico, Aspen Plus, Aspen HYSYS

ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Motivos para la instalación de ciclos ORC en buques	1
1.2	Aspecto económico	2
2	OBJETIVO	3
3	METODOLOGÍA	3
4	ANTECEDENTES	5
5	CARACTERÍSTICAS DEL BUQUE.....	7
6	DESCRIPCIÓN DE LOS ORC	9
7	SIMULACIÓN DE LOS ORC.....	12
7.1	Simulación en HYSYS	12
7.2	Simulación en Aspen Plus	12
7.3	Ciclo subcrítico R236ea	13
7.4	Ciclo transcrito R1234ze(E)	15
7.5	Verificación de modelo.....	17
8	SIMULACIÓN DE LOS CICLOS SIN AIRE DE BARRIDO.....	21
8.1	Ciclo de R236ea sin aire de barrido	22
8.2	Ciclo de 1234ze(E) sin aire de barrido	25
9	DIMENSIONAMIENTO DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR.....	28
9.1	Funcionamiento del Aspen EDR	31
9.2	Diseño de los intercambiadores del ciclo subcrítico de R236ea	32
9.2.1	Simulación con máximas pérdidas admisibles	32
9.2.2	Dimensionamiento de los equipos.....	34
9.3	Diseño de los intercambiadores del ciclo transcrito de R1234ze(E)	39
9.3.1	Simulación con máximas pérdidas admisibles	39
9.3.2	Dimensionamiento de los equipos.....	40

9.4	Dimensionamiento de los intercambiadores del ciclo subcrítico de R236ea sin aire de barrido.....	46
9.4.1	Simulación con máximas pérdidas admisibles	46
9.4.2	Dimensionamiento de los equipos.....	48
9.5	Dimensionamiento de los intercambiadores del ciclo transcrito de R1234ze(E) sin aire de barrido.....	52
9.5.1	Simulación con máximas pérdidas admisibles	52
9.5.2	Dimensionamiento de los equipos.....	54
10	SIMULACIÓN REAL DE LOS CICLOS	58
10.1	Ciclo subcrítico de R236ea	58
10.2	Ciclo transcrito de R1234ze(E)	60
10.3	Ciclo subcrítico de R236ea sin aire de barrido	62
10.4	Ciclo transcrito de R1234ze(E) sin aire de barrido.....	64
11	ESTUDIO DE ECONÓMICO	67
11.1	Ciclo subcrítico de R236ea con aire de barrido	71
11.2	Ciclo transcrito de R1234ze(E) con aire de barrido	72
11.3	Ciclo subcrítico de R236ea sin aire de barrido	74
11.4	Ciclo transcrito de R1234ze(E) sin aire de barrido.....	75
12	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	78
13	CONCLUSIÓN	81
14	REFERENCIAS.....	82
15	DEFINICIONES ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS	84
16	ÍNDICE DE TABLAS	86
17	ÍNDICE DE FIGURAS	90

1 INTRODUCCIÓN

El transporte marítimo es actualmente la manera más eficiente del traslado de mercancías. En lo que se refiere al comercio mundial, el 90 % de la carga es transportada por buques. Esto provoca que, a pesar de ser el método de transporte más eficiente en cuanto a emisiones, es responsable del 2,4 % de las emisiones de CO₂ de origen antropogénico, 15 % de las emisiones de NO_x y 13 % de las emisiones de SO_x [1]. Estos valores son lo suficientemente elevados como para que la OMI haya tomado medidas para limitar y reducir el impacto ambiental en la atmósfera. Estas reglas se recogen en el Anexo VI del convenio MARPOL, el cual incluye la normativa para mejorar la eficiencia energética de los buques [1].

La flota mundial se constituye en un 60 % de portacontenedores, graneleros, buques de carga general y de servicio [2]. De todos estos, un 30 % de la potencia acumulada está instalada en portacontenedores, aunque las unidades operativas de este tipo de buques son relativamente bajas [2]. Este grupo es responsable de más del 65 % de emisiones generadas por los buques anualmente. Los datos mencionados ejemplifican la necesidad de reducir las emisiones en el ámbito marítimo mediante la implementación de sistemas que mejoren la eficiencia. Si a esto sumamos que la potencia de propulsión en portacontenedores, graneleros, y buques de carga general es desarrollada principalmente por motores de combustión interna, el panorama se ve muy favorable para la instalación de sistemas que aprovechen las fuentes de energía residual: gases de escape, aire de barrido, agua de camisas y aceite térmico.

1.1 Motivos para la instalación de ciclos ORC en buques

De toda la energía que aporta el combustible se desecha aproximadamente el 50 % debido a la eficiencia de los motores marinos. El aprovechamiento de las fuentes de energía residual reduciría el consumo de combustible y con ello la contaminación producida por el buque, además de que mejoraría la eficiencia contribuyendo a reducir el Índice de Diseño de Eficiencia Energética (EEDI) [1].

El ciclo orgánico de Rankine (ORC) opera bajo los mismos principios que el ciclo de vapor de agua: el fluido de trabajo incrementa la presión en la bomba, cambia de fase en el vaporizador, se expande en la turbina y condensa para volver a ser impulsado por la bomba. A diferencia del ciclo Rankine convencional, los ORC

emplean fluidos orgánicos que tienen propiedades termodinámicas más adecuadas para un mejor aprovechamiento de las fuentes de calor de baja temperatura (temperatura inferior a 250 °C) [3].

1.2 Aspecto económico

Respecto a la viabilidad económica de WHRS basados en la tecnología ORC, se debe tener en cuenta los costes derivados de su instalación y operación, y el ahorro de combustible generado. Esto implica que el precio del combustible tendrá una gran influencia a la hora de rentabilizar una instalación de este tipo, ya que un aumento del precio reduce considerablemente el tiempo de amortización [1]. Además, cada vez tendrán más protagonismo combustibles con bajo contenido de azufre, como puede ser el caso del gas natural licuado (GNL), que producen una menor cantidad de ceniza. Esto favorece una amortización más temprana ya que la energía residual de los gases de escape sería mayor [1], [4].

Aun considerando estas circunstancias, los ORC a pequeña escala siguen sin ser atractivos a nivel comercial, ya que el precio unitario €/kW de los mismos todavía es muy alto como para garantizar su rentabilidad [1]. En consecuencia, se desarrollan mejoras de los componentes del ciclo y se elaboran estructuras ORC con la necesidad de aumentar la eficiencia todo lo posible; en esto, los ciclos simples han demostrado ser los más rentables [1].

2 OBJETIVO

El objetivo de este trabajo fin de grado es el de estudiar la viabilidad económica de la instalación de ORC en un buque portacontenedores. Se simulan cuatro ORC diferentes que aprovechan la energía residual de un motor de combustión interna de dos tiempos: ciclo subcrítico con aprovechamiento de las fuentes de calor residual de agua de camisas, aire de barrido y gases de escape; ciclo transcrito con aprovechamiento de las fuentes de calor residual de agua de camisas, aire de barrido y gases de escape; ciclo subcrítico con aprovechamiento de las fuentes de calor residual de agua de camisas y gases de escape y ciclo transcrito con aprovechamiento de las fuentes de calor residual de agua de camisas y gases de escape. Los fluidos de trabajo utilizados en los ciclos subcríticos y transcritos son respectivamente el R236ea y R1234ze(E). Con los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas mediante la suite AspenONE se determina el tiempo de amortización y el ahorro de combustible de los ciclos.

3 METODOLOGÍA

Para poder realizar el estudio económico se debe verificar primero que el modelo termodinámico es válido y replicable, para ello empleamos el software de simulación de procesos Aspen Plus y HYSYS. Seguidamente a partir de los datos de la verificación el modelo se suponen unas pérdidas máximas admisibles y se simulan los ciclos en estas condiciones para realizar el dimensionamiento de los intercambiadores con el software Aspen Exchanger Design and Rating (Aspen EDR). Una vez dimensionados los intercambiadores se incorpora su diseño a la simulación en HYSYS y se realiza el análisis económico a partir de los resultados de esta. En la Figura 3.1 se muestra el diagrama de bloques con las acciones realizadas para alcanzar el objetivo del trabajo.

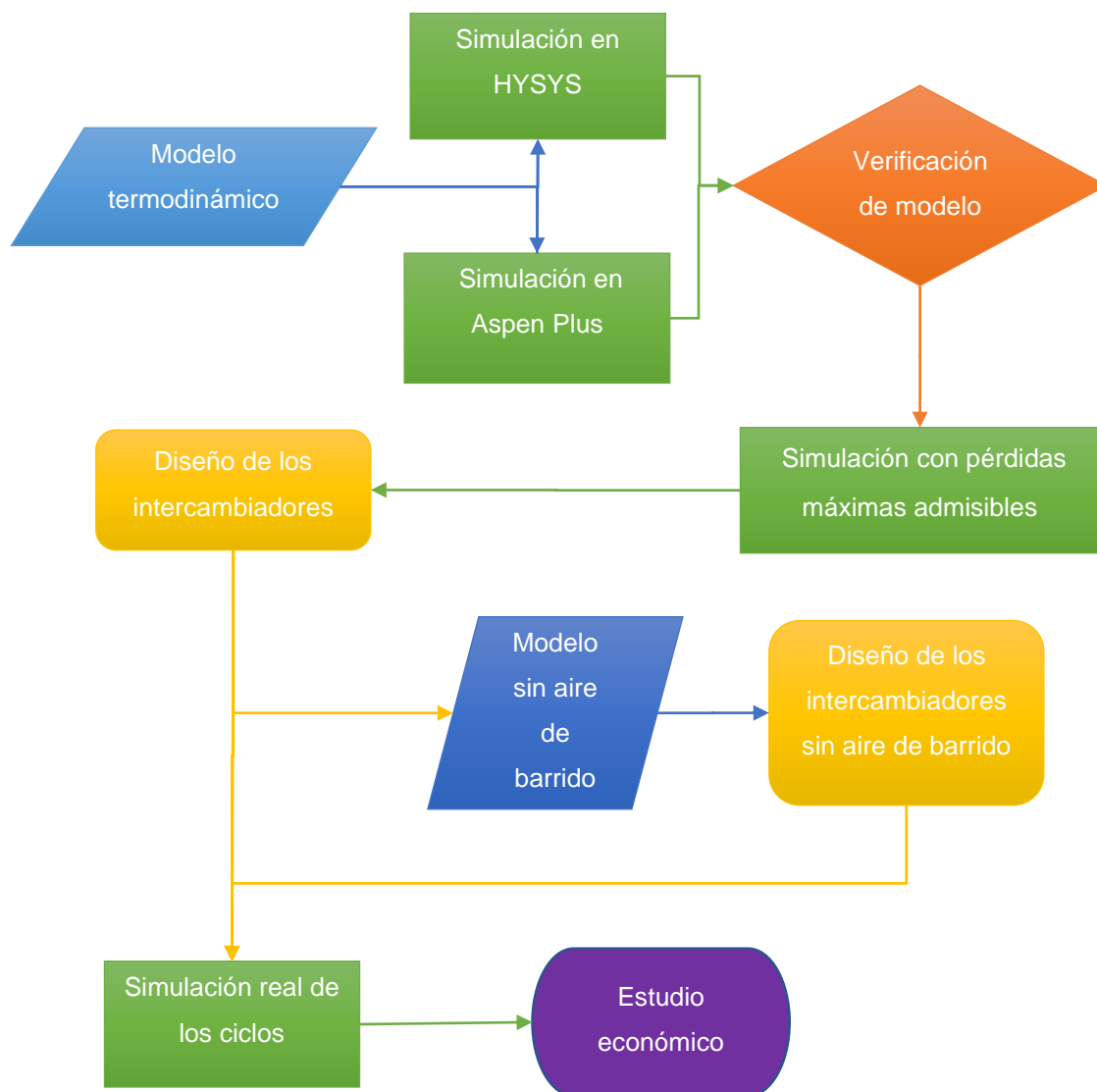


Figura 3.1 - Metodología llevada a cabo en el trabajo fin de grado.

4 ANTECEDENTES

La tecnología de los ORC comenzó a desarrollarse como alternativa al ciclo Rankine de vapor en 1859, pero no fue hasta las décadas de 1960 y 1970 que se comenzó a investigar más seriamente sobre el uso de estos ciclos [5]. Hoy en día, su funcionalidad está más que probada y muchos artículos de investigación tratan esta tecnología a la que se le augura un papel importante en el campo del aprovechamiento energético y la reducción de emisiones. Pierobon et al. [6] realizan el diseño y optimización de un ciclo ORC para el aprovechamiento del calor residual de una turbina de gas instalada en una plataforma. Utilizando un algoritmo de optimización se busca potenciar la eficiencia térmica del ciclo, el valor actual neto del proyecto y disminuir el volumen total del sistema empleando como variables el fluido de trabajo, las condiciones de entrada y salida de la turbina, la velocidad de los fluidos y las temperaturas mínimas de aproximación en los intercambiadores. Como resultado obtiene que el ciclopentano y acetona son los fluidos que mayor eficiencia térmica y valor actual neto producen bajo esas condiciones. Yang [7] investiga el rendimiento económico producido por un ciclo ORC compacto para el aprovechamiento del calor residual de un motor diésel marino. Como fluido de trabajo emplea R1234yf y utiliza los gases de escape, agua de camisas y el agua de refrigeración del aire de barrido como fuentes de calor. Se comparan tres configuraciones diferentes de ORC: la primera aprovecha el calor de todas las fuentes, la segunda emplea el agua de camisas y los gases de escape y la tercera solamente los gases de escape. Los resultados sugieren que la primera configuración obtiene mayor rendimiento económico y produce una mayor reducción de las emisiones. Larsen et al. [8] investiga el efecto que tendría el empleo de un ORC a la hora de disminuir las emisiones de NO_x en buques con motores marinos lentos de dos tiempos. Como resultado se obtiene una reducción del 6,5 % de las emisiones de NO_x .

No hace mucho que se han comenzado a emplear los ORC en buques. El primer sistema se instaló en 2012 en el buque LCTC MV Fíguro y está desarrollado por la empresa Opcom. Este es capaz de obtener una potencia de 500 kW y generar un ahorro de combustible del 4-6 % empleando el calor residual del agua de camisas [9]. Calnetix en unión con Mitsubishi Heavy Industries desarrolla un ciclo ORC

específicamente diseñado para aprovechar el calor residual del agua de camisas, el cual fue aprobado por la Lloyd's Registry (LR) y Nippon Kaiji Kyokai (NK) en marzo de 2015. Este equipo es capaz de desarrollar una potencia de 125 kW y se instaló en el Arnold Maersk en abril de 2016 [10]. En 2015 se instala en el Viking Grace, un crucero, otro ciclo ORC esta vez desarrollado por Climeon. Según la empresa en este tipo de buques la instalación de ORC podría reducir el consumo de combustible un 5 %. En el año 2017, la naviera vuelve a hacer otro en cargo a la empresa para instalar su tecnología en varios de sus buques [11].

5 CARACTERÍSTICAS DEL BUQUE

El buque sobre el que se realiza el estudio termodinámico es el portacontenedores CAP ARNAUTI con una capacidad de 6600 TEU [12]. En la Tabla 5.1 se muestran las características principales del buque.

Dimensiones principales	
Eslora máxima (m)	270,90
Eslora entre perpendiculares (m)	258,40
Manga de trazado (m)	42,80
Puntal de trazado (m)	20,24
Arqueo	
Bruto (m)	68 809
Neto (m)	39 534
Calado	
Verano (m)	14,56
Diseño (m)	13,00
Capacidad	
Total (TEU)	6622
En cubierta (TEU)	3845
En bodega (TEU)	2777
Contenedores de 14t. (TEU)	4835
Contenedores refrigerados. (TEU)	600
Propulsión	
Motor principal	MAN B&W 6S80ME-C 9.5
Motores auxiliares	MAN 7L27/38

Tabla 5.1 - Datos del buque portacontenedores CAP ARNAUTI de 6600 TEU

La potencia calorífica recuperable de las fuentes de energía residual depende de la carga del motor. Para el estudio termodinámico previo se toma el valor nominal de carga del 75 % y la Tabla 5.2 muestra los valores de temperatura, presión y flujo másico de las fuentes de calor residual que sirven de base para realizar el estudio termodinámico [12].

Fluido	T (°C)	P (bar)	Flujo másico (kg/s)
Gases de escape	220,00	-	-
Aire de barrido	165,00	3,22	49,48
Agua de camisas	85,00	3,00	31,10

Tabla 5.2 - Fuentes de calor disponibles.

La potencia calorífica disponible de las fuentes para la generación de energía eléctrica está limitada por las necesidades del buque ya que parte de la energía residual se emplea en satisfacer servicios como la producción de vapor en el economizador (gases de escape) o la generación de agua dulce (agua de camisas). Además, se debe evitar la posibilidad de formación de rocío ácido en el escape, es decir, la temperatura de los gases no puede bajar de 160 °C. Respecto a la temperatura de agua de camisas, esta no debe descender de los 70 °C.

6 DESCRIPCIÓN DE LOS ORC

Los ORC empleados consistirán en un ciclo simple por el cual se bombea el fluido de trabajo a través de una serie de intercambiadores donde aumenta su temperatura gradualmente, recuperando el calor no aprovechado en el motor principal proveniente del agua de camisas, el aire de barrido y los gases de escape. Así mismo, se dispone de un fluido intermedio (Therminol 55) entre los gases de escape y el fluido de trabajo para mejorar el desempeño y seguridad de la instalación. El esquema del ORC simple se puede ver en la Figura 6.1.

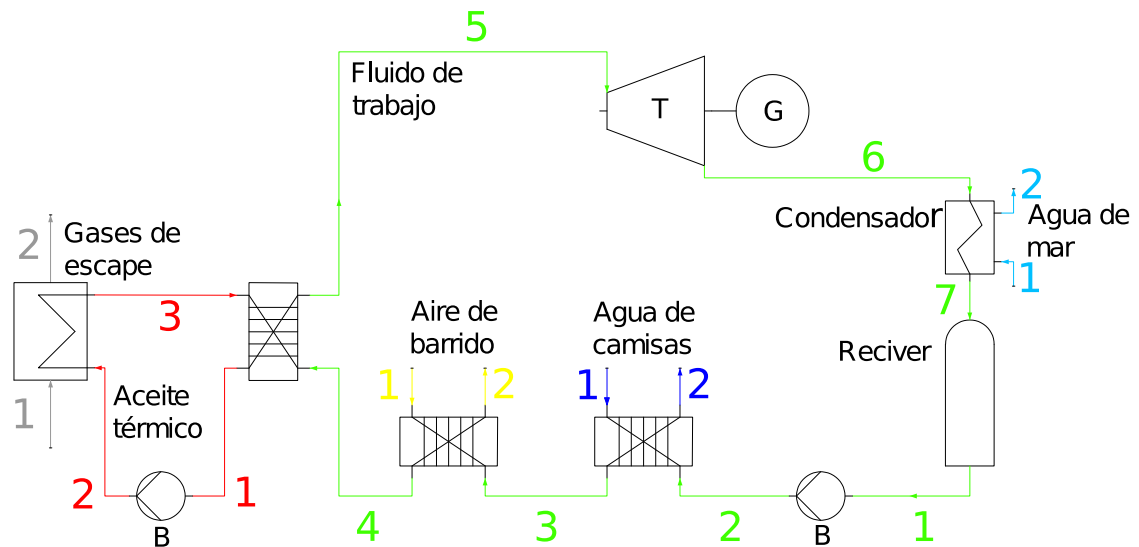


Figura 6.1 - Esquema del circuito de WHRS.

El ciclo subcrítico opera con R236ea como fluido de trabajo. Este es presurizado por la bomba hasta una presión igual o superior a la de vaporización e incrementa su temperatura, antes del proceso de cambio de fase, en el intercambiador de agua de camisas y aire de barrido. A continuación, se vaporiza en el intercambiador alimentado con Therminol 55, que cede al R236ea la energía recuperada de los gases de escape. El fluido de trabajo en condiciones de vapor saturado se expande en la turbina donde parte de su energía se convierte en potencia eléctrica. Por último, el vapor a baja presión se condensa en el intercambiador con

agua de mar para volver a iniciar el ciclo. En la Figura 6.2 se puede ver el diagrama T-s de los ciclos subcríticos.

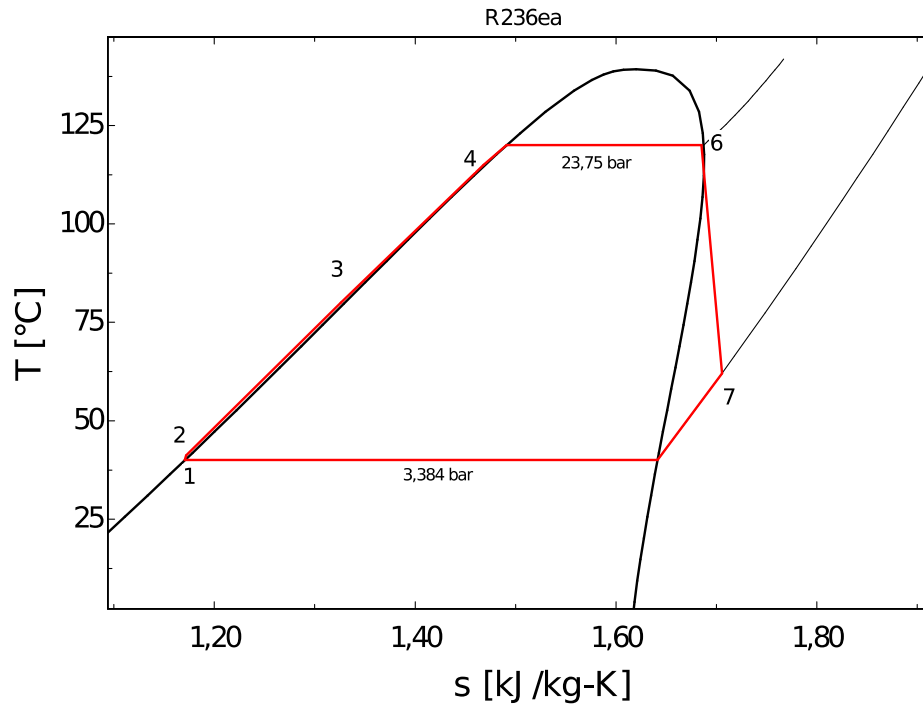


Figura 6.2 - Diagrama T-s del circuito con R236ea

El ciclo transcrítico cuenta con el R1234ze(E) como fluido de trabajo. En este la presión de funcionamiento es superior a la crítica, por lo que no se necesita aporte de calor latente al ciclo. Toda la energía aportada por los intercambiadores, los mismos que en el circuito subcrítico, es empleada en el aumento de temperatura del fluido de trabajo. En este ciclo, a diferencia del subcrítico, el cambio de estado tendrá lugar en el intercambiador de aire de barrido y seguirá aumentando su temperatura con el calor aportado por el Therminol 55 hasta la temperatura de entrada a la turbina. Posteriormente el fluido es condensado y vuelve al estado inicial del ciclo.

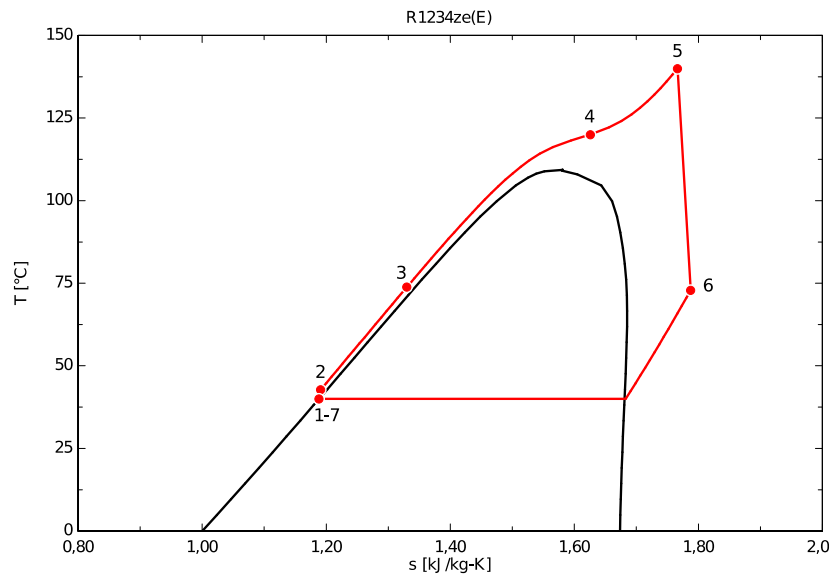


Figura 6.3 – Diagrama T-s del ciclo transcrito.

Se realiza también el estudio de los ciclos sin la instalación de un intercambiador de aire de barrido, ya que se trata de un equipo que requiere un gran área de intercambio. Esto puede provocar que el tamaño de los ciclos sea demasiado grande para el lugar en el que se situaría.

7 SIMULACIÓN DE LOS ORC

En las simulaciones de los ciclos con el Aspen Plus y HYSYS se consideran los mismos parámetros de entrada. Antes de realizar las simulaciones, se deben especificar los paquetes que calculan las propiedades de los fluidos:

- Paquete Refprop específico para los fluidos refrigerantes R236ea y R1234ze(E).
- Paquete IAWPS-95 específico para el agua.
- Paquete IDEAL para las propiedades del aire.
- Paquete NTRL indicado para el aceite térmico Therminol 55.

7.1 Simulación en HYSYS

Para comenzar a desarrollar un nuevo modelo en HYSYS, primero se debe seleccionar la pestaña Properties los fluidos que se van a emplear en la simulación. Se crea una lista de componentes para cada fluido que intervenga en el ciclo, en caso de que dos fluidos pudiesen funcionar bajo el mismo paquete de propiedades podrían incluirse en una misma lista. Los componentes se pueden seleccionar de la base de datos de Aspen o de HYSYS, para las simulaciones se selecciona la base de Aspen. Una vez seleccionados los fluidos de la simulación se le atribuye a cada lista el paquete de propiedades indicados anteriormente.

Seguidamente se pasa a la pestaña de simulación en donde se seleccionan los elementos del ciclo, la bomba, los intercambiadores y el turbina. En el menú de cada elemento se especifica con que puntos del circuito está comunicado directamente y que fluido llega por cada corriente, como también las propiedades concretas que se desee especificar de cualquier punto del circuito.

7.2 Simulación en Aspen Plus

En Aspen Plus no es necesaria la creación de listas para añadir los fluidos de la simulación, se añaden a una biblioteca común y se selecciona un paquete de propiedades general antes de pasar al entorno de simulación. En el entorno de simulación se insertan los diferentes intercambiadores, bombas y turbina y se unen mediante las corrientes (streams). En este caso las condiciones iniciales de cada fluido se deben especificar en cada corriente en particular. En los bloques podemos establecer las condiciones de salida de cada uno o la potencia calorífica cedida en

un intercambiador. Se debe especificar en la pestaña block options de cada uno de los bloques el paquete de propiedades que se aplica a cada uno de los fluidos que interactúan con dicho bloque, es decir en caso del condensador se debe especificar el paquete Refprop para el fluido de trabajo y el paquete IAWPS-95 para el agua. Una vez especificados los caudales, temperaturas, presiones y función de todos los bloques se podrá realizar la simulación.

7.3 Ciclo subcrítico R236ea

Los parámetros de entrada que el modelo para la simulación del ciclo:

- La temperatura de condensación del fluido de trabajo R236ea son 40 °C.
- El R236ea abandona el intercambiador de camisas a 80 °C.
- La temperatura del R236ea a la salida del calentador de aire de barrido es de 115 °C.
- La temperatura de cambio de estado del R236ea es de 120 °C.
- El título del fluido de trabajo a la entrada de la turbina es 1.
- La temperatura del fluido de trabajo a la salida del condensador es de 40 °C y su título 0.
- La temperatura del Therminol 55 a la entrada del evaporador es de 175 °C y a la salida de 140 °C, la presión 1 bar.
- La diferencia mínima de temperatura entre el Therminol 55 y el R236ea se establece en 20 °C.
- Las condiciones de entrada del aire de barrido al calentador son de 167 °C y 3,22 bar.
- La diferencia mínima de temperaturas en el intercambiador de aire de barrido es de 10 °C.
- Las condiciones de entrada del agua de camisas al intercambiador son de 85 °C y 3 bar.
- La diferencia mínima de temperaturas en el calentador de agua de camisas es de 5 °C.
- El agua de mar (simulada como agua pura) entra en el condensador a 25 °C y sale a 30 °C a la presión de 1 bar.
- El rendimiento isoentrópico de la turbina y de la bomba es del 80 %, y los rendimientos electromecánicos son de 0,925 para el turbogenerador y 0,85 para la bomba.

- No se suponen pérdidas de carga en los intercambiadores.

En la Figura 7.3.1 se puede ver la simulación realizada mediante Aspen Plus y en la Figura 7.3.2 se puede ver la simulación realizada en HYSYS

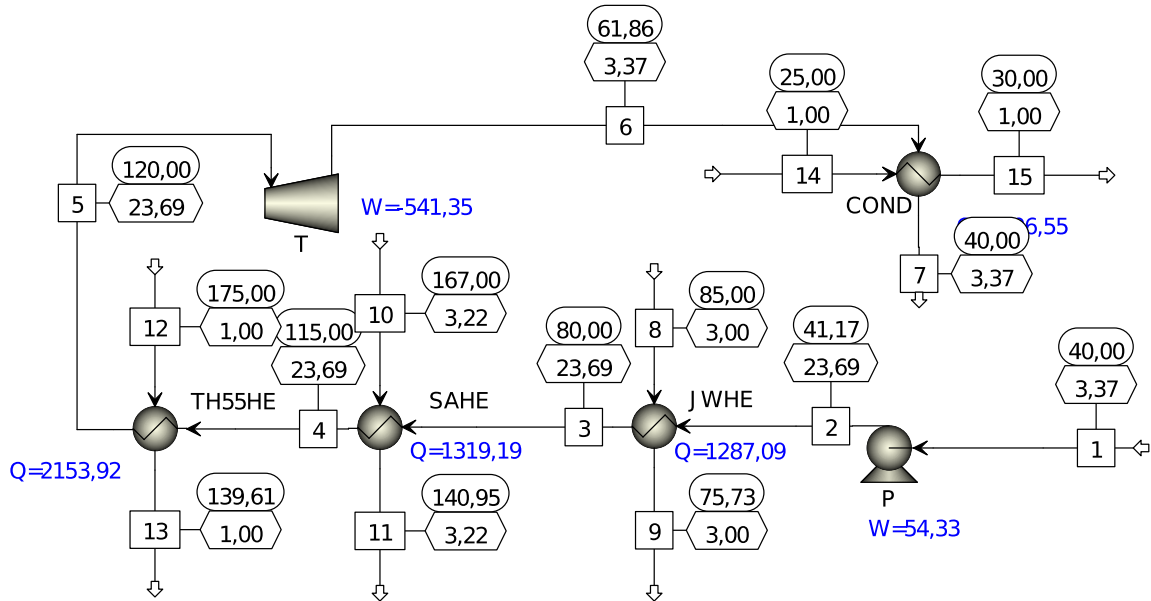


Figura 7.3.1 - Verificación de modelo en Aspen Plus: ciclo transcrito con R236ea.

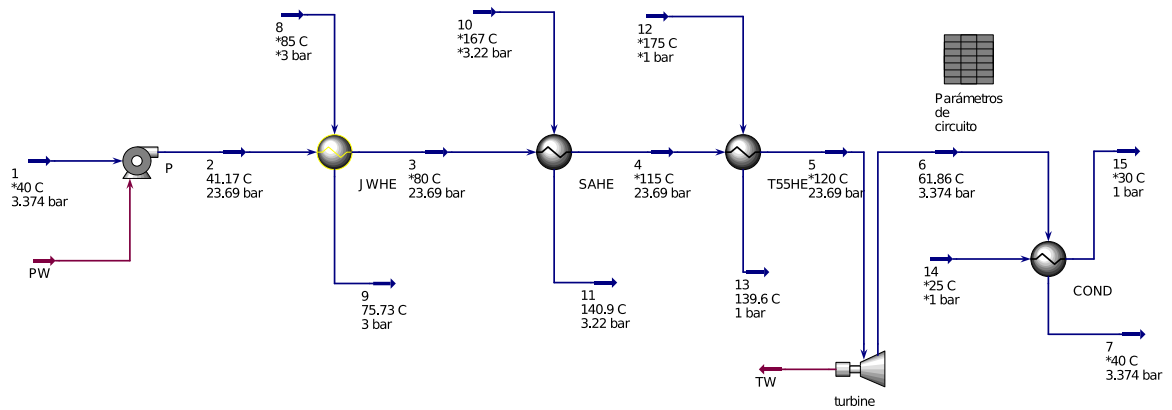


Figura 7.3.2 – Verificación de modelo en HYSYS: ciclo subcrítico con R236ea.

7.4 Ciclo transcrito R1234ze(E)

Los parámetros de entrada para la simulación del ciclo transcrito son los siguientes:

- La presión del fluido a la entrada de la turbina debe ser de 43,5 bar.
- La potencia calorífica aportada por el calentador de agua de camisas no debe superar los 1 730 kW.
- La temperatura del R1234ze(E) a la salida del calentador de aire de barrido debe ser de 120 °C.
- Las temperaturas de entrada y salida del Therminol 55 a la entrada y la salida del calentador son 175 °C y 140 °C respectivamente, y su presión será de 1 bar.
- La temperatura de condensación del fluido de trabajo es de 40 °C y el título a salida del condensador será 0.
- La diferencia de temperatura mínima en el intercambiador de Therminol 55 será de 20 °C.
- Las condiciones del aire de barrido a la entrada del calentador son 167 °C y 3.22 bar; su flujo másico será de 49,89 kg/s.
- La diferencia mínima de temperaturas en el calentador de aire de barrido será de 10 °C.
- Las condiciones del agua de camisas a la entrada en el calentador serán de 85 °C y 3 bar; con un flujo másico de 30,10 kg/s.
- El agua de mar entrará al condensador a 25 °C y saldrá a 30 °C, a la presión de 1 bar.
- El rendimiento isoentrópico de la turbina y de la bomba es del 80 %, y rendimiento electromecánico será de 0,925 para el turbogenerador y 0,85 para la bomba.

- No se suponen pérdidas de carga en los intercambiadores.

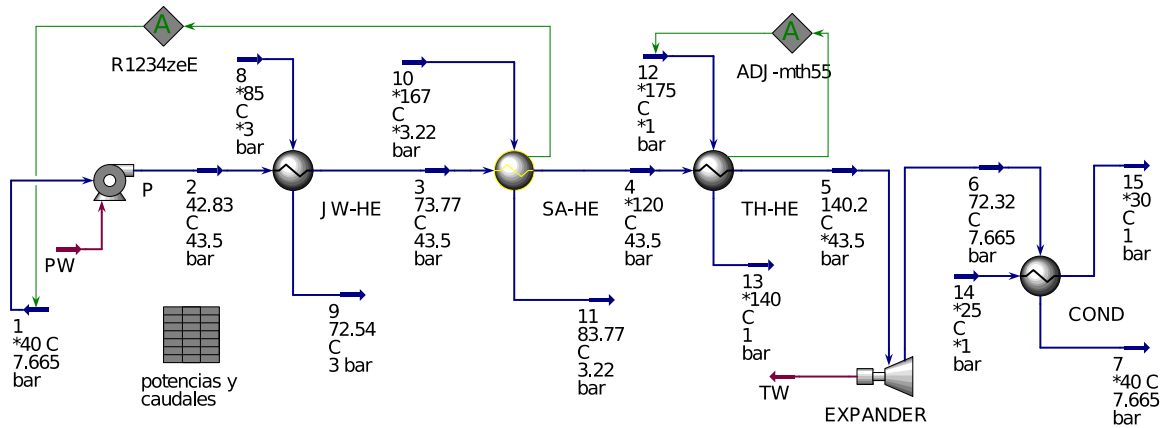


Figura 7.3.1 - Entorno de simulación de HYSYS. Ciclo transcrítico con R1234ze(E), verificación de modelo.

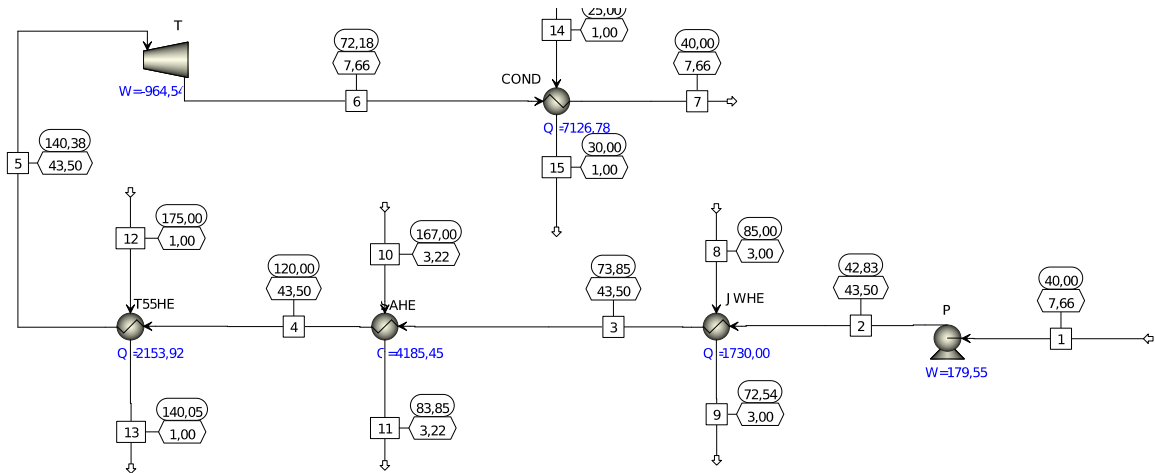


Figura 7.4.2 - Entorno de simulación de Aspen Plus. Ciclo transcrítico con R1234ze(E), verificación de modelo.

7.5 Verificación de modelo

De las simulaciones realizadas tanto en Aspen Plus como en HYSYS se han obtenido los siguientes valores de presión y temperatura para los diferentes fluidos del circuito a lo largo de los puntos de este, dispuestos en la Tabla 7.5.1 junto con los datos del modelo realizado en EES.

Fluido	Puntos	EES [12]		HYSYS		Aspen Plus	
		T (°C)	P (bar)	T (°C)	P (bar)	T (°C)	P (bar)
R236ea	1	40,00	3,38	40,00	3,37	40,00	3,37
	2	41,19	23,75	41,17	23,69	41,17	23,69
	3	80,00	23,75	80,00	23,69	80,00	23,69
	4	115,00	23,75	115,00	23,69	115,00	23,69
	5	120,00	23,75	120,00	23,69	120,00	23,69
	6	62,005	3,38	61,86	3,37	61,86	3,37
	7	40,00	3,38	40,00	3,37	40,00	3,37
Agua de camisas	8	85,00	3,00	85,00	3,00	85,00	3,00
	9	75,60	3,00	75,73	3,00	75,73	3,00
Aire de barrido	10	167,00	3,22	167,00	3,22	167,00	3,22
	11	141,10	3,22	140,90	3,22	140,95	3,22
Therminol 55	12	175,00	1,00	175,00	1,00	175,00	1,00
	13	140,00	1,00	140,00	1,00	139,62	1,00
Agua de mar	14	25,00	1,00	25,00	1,00	25,00	1,00
	15	30,00	1,00	30,00	1,00	30,00	1,00

Tabla 7.5.1 - Presión y temperatura de los fluidos obtenidos en la verificación de modelo subcrítico.

Los caudales del fluido de trabajo R236ea y el aceite térmico Therminol 55 se deben regular utilizando los bloques “desing spec”. En estos se establece una variable

objetivo y una variable que debe ser regulada. En el regulador de R236ea la variable objetivo fijada es el título 1 a la salida del evaporador, y en el regulador de Therminol 55 se establece un set point de 2153,92 kW cedidos en el evaporador, la variable a regular en ambos casos se trata del flujo másico de ambos fluidos. Para el agua de mar, de igual manera se establece un set point de 30 °C a la salida del condensador estableciendo como variable dependiente también su flujo másico. En la Tabla 7.5.2 se verifican los caudales másicos de las corrientes y las potencias caloríficas intercambiadas.

Parámetro	EES [12]	HYSYS	Aspen PLUS	Unidades
Flujo de R236ea	24,98	25,04	25,04	kg/s
Flujo de Therminol 55	25,73	25,69	25,42	
Flujo de agua de mar	201,05	201,20	201,25	
Pot. calorífica en el calentador de agua de camisas.	1284	1287,29	1287,09	kW
Pot. calorífica en el calentador de aire de barrido	1316	1319,39	1319,19	
Pot. calorífica en el intercambiador de Therminol 55	2153,92	2153,92	2153,92	
Pot. calorífica disipada en el condensador	4202	4207,20	4206,55	
Pot. eléctrica neta generada en el ciclo	482,3	487,10	487,02	
Pot. calorífica total suministrada al ciclo	4754	4760,94	4760,20	
Eficiencia	10,14	10,23	10,23	

Tabla 7.5.2 - Caudales y potencias obtenidos para la verificación del modelo subcrítico.

Los resultados del ciclo transcrito con R1234ze(E) se muestran a continuación en la Tabla 7.5.3 comparando los resultados de presión y temperatura obtenidos en las simulaciones con los del ciclo modelo.

Fluido	Puntos	EES [12]		HYSYS		Aspen Plus	
		T (°C)	P (bar)	T (°C)	P (bar)	T(°C)	P(bar)
R1234ze(E)	1	40,00	7,67	40,00	7,67	40,00	7,67
	2	42,79	43,50	42,83	43,50	42,83	43,50
	3	73,84	43,50	72,28	43,50	73,85	43,50
	4	120,00	43,50	120,00	43,50	120,00	43,50
	5	140,20	43,50	140,40	43,50	140,52	43,50
	6	72,89	7,67	72,62	7,67	72,75	7,67
	7	40,00	7,67	40,00	7,67	40,00	7,67
Agua de camisas	8	85,00	3,00	85,00	3,00	85,00	3,00
	9	72,54	3,00	72,54	3,00	72,54	3,00
Aire de barrido	10	167,00	3,22	167,00	3,22	167,00	3,22
	11	83,84	3,22	83,77	3,22	83,85	3,22
Therminol 55	12	175,00	1,00	175,00	1,00	175,00	1,00
	13	140,00	1,00	140,00	1,00	140,00	1,00
Agua de mar	14	25,00	1,00	25,00	1,00	25,00	1,00
	15	30,00	1,00	30,00	1,00	30,00	1,00

Tabla 7.5.3 - Presiones y temperaturas para la verificación de modelo del ciclo transcrito.

Para ajustar en HYSYS los caudales de los fluidos es necesario emplear el bloque Adjust, en este caso el caudal de R1234ze(E) se ajusta para que la diferencia mínima de temperatura en el intercambiador de aire de barrido sea de 10 °C, y el caudal de Therminol 55, al igual que en el ciclo subcrítico, se ajusta a un set point de 2153,92 kW cedidos en el intercambiador, como en el caso del ciclo subcrítico, la variable regulada es el caudal de ambos fluidos; en HYSYS no es necesario emplear un Adjust para el caudal de agua de mar ya que este lo calcula por defecto al establecer las condiciones de entrada y salida de los fluidos una vez conozcamos el caudal circulante para el fluido de trabajo. Se obtienen tanto de la simulación en HYSYS como en Aspen Plus los valores de caudal y de la Tabla 7.5.4.

Parámetro	EES [12]	HYSYS	Aspen PLUS	Unidades	
Flujo de R1234ze(E)	38,01	37,98	37,87	Kg/s	
Flujo de Therminol 55	25,73	25,69	25,71		
Flujo de agua de mar	344,31	342,80	342,04		
Pot. calorífica en el intercambiador de agua de camisas.	1730,00	1730,00	1730,00	kW	
Pot. calorífica en el intercambiador de aire de barrido	4234,00	4202,00	4185,61		
Pot. calorífica en el intercambiador de Therminol 55	2153,92	2153,92	2153,92		
Pot. calorífica disipada en el condensador	7196,00	7165,00	7149,56		
Pot. eléctrica neta generada en el ciclo	779,30	789,90	788,46		
Pot. calorífica total suministrada al ciclo	8118,00	8086,00	8069,53		
Eficiencia	9,60	9,77	9,76		%

Tabla 7.5.4 - Caudales y potencias obtenidos para la verificación del modelo subcrítico.

Estas simulaciones se han realizado previamente en las versiones 10.0 y 11.0 de los programas y en ambas se han producido errores relacionados con las presiones o temperaturas obtenidas en el punto 2 para el fluido de trabajo de ambos ciclos, lo que no ocurre en la versión 12.0 empleada finalmente.

Los resultados obtenidos tanto en el ciclo con R236ea como en el ciclo de R1234ze(E) se muestran muy similares a los del modelo y cumplen los requisitos de diseño de los ciclos por lo tanto se concluye que este es replicable y las simulaciones son válidas para ambos ciclos.

8 SIMULACIÓN DE LOS CICLOS SIN AIRE DE BARRIDO

Como se puede observar en los resultados en ambas simulaciones, tanto para el ciclo subcrítico como para el transcrito, el intercambiador de aire de barrido aporta buena parte de la potencia calorífica. Sin embargo, su utilización conlleva dificultades a la hora de realizar un diseño realista del ciclo debido a la gran superficie del intercambiador de calor. Por ello, se realiza la simulación de los ciclos sin este intercambiador para comparar su rendimiento con los ciclos que si lo utilizan. La configuración de los ciclos sin intercambiador de aire de barrido es representada en la Figura 8.1.

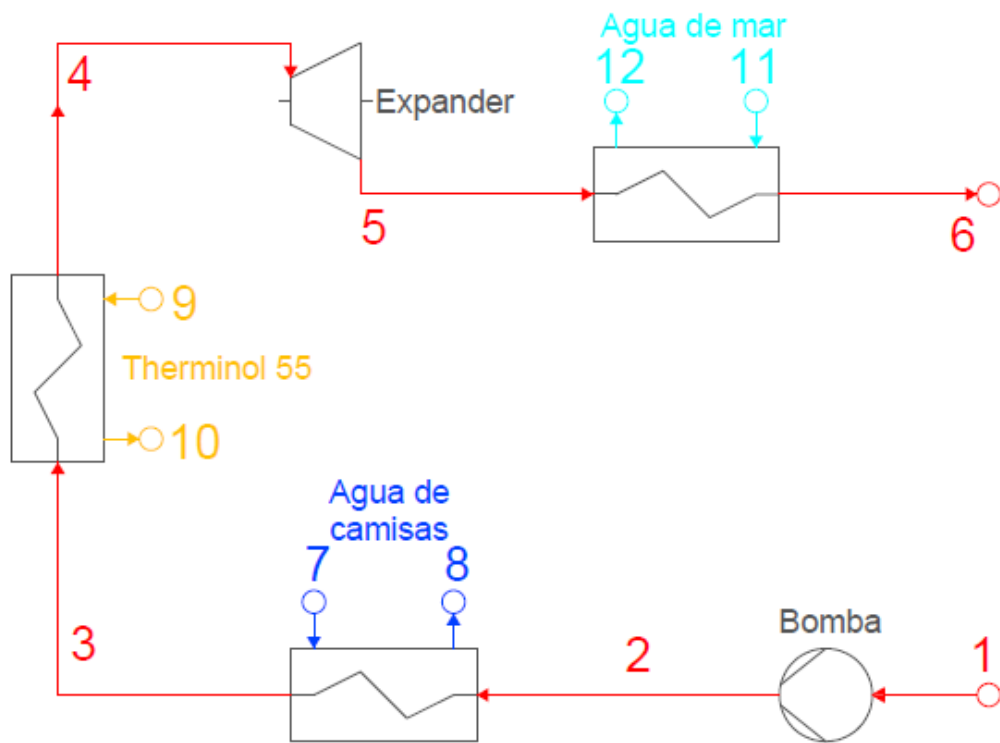


Figura 8.1 - Esquema de los ciclos sin intercambiador de aire de barrido.

8.1 Ciclo de R236ea sin aire de barrido

A continuación, se fijan las condiciones que debe cumplir el modelo termodinámico del ciclo.

- El fluido de trabajo es el R236ea.
- La temperatura de condensación es de 40 °C.
- La presión de descarga de la bomba es la presión de saturación a la temperatura de entrada a la turbina, para este ciclo 120 °C.
- La temperatura de salida del intercambiador del agua de camisas es de 80 °C para el fluido de trabajo.
- La diferencia mínima de temperaturas en el intercambiador de agua de camisas debe ser de 5 °C.
- La temperatura del R236ea en la salida del evaporador de Therminol 55 debe ser de 120 °C con título de vapor 1.
- La diferencia de temperatura mínima entre el Therminol 55 y el R236ea debe ser de 20 °C.
- La potencia cedida por el Therminol 55 al R236ea es de 2153.92 kW.
- El rendimiento isoentrópico de la bomba y del turbina es 0,8 y su rendimientos electromecánicos de 0,85 y 0,9025 respectivamente.

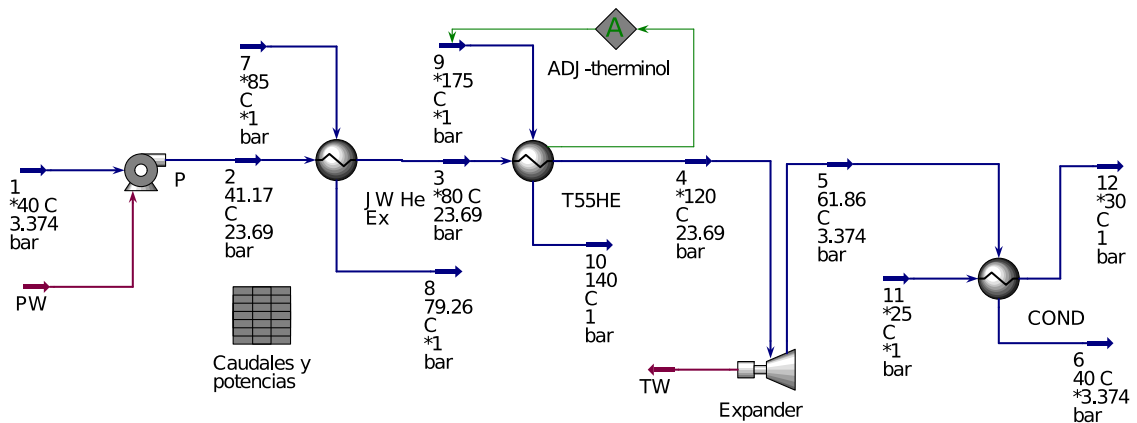


Figura 8.2 – Simulación en HYSYS del ciclo subcrítico de R236ea sin aire de barrido.

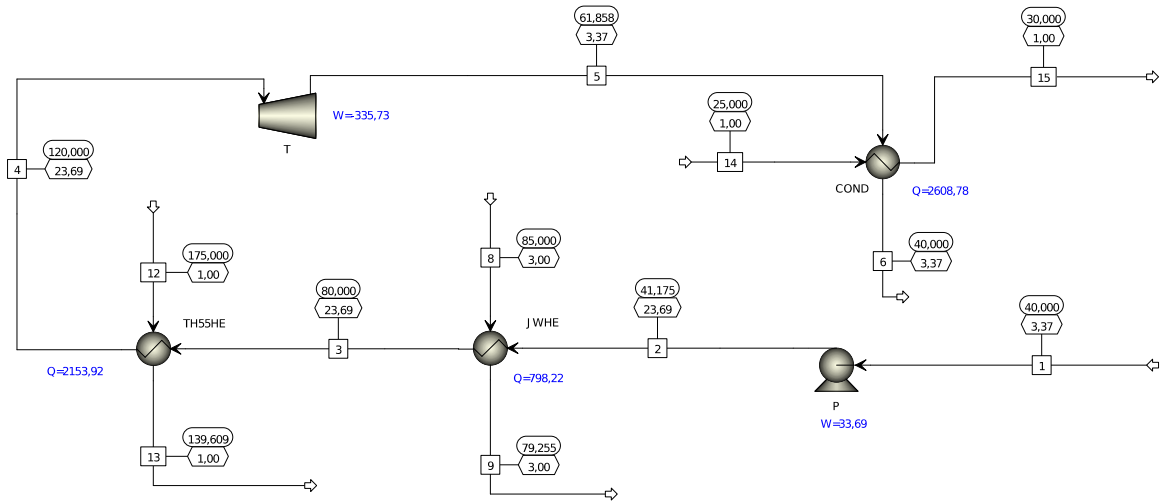


Figura 8.3 – Simulación del ciclo subcrítico de R236ea sin aire de barrido.

Las presiones y temperaturas obtenidas para los diferentes fluidos a lo largo de los diferentes puntos del ciclo se muestran a continuación en la Tabla 8.1.1 para HYSYS y Aspen Plus.

Fluido	Puntos	HYSYS		Aspen Plus	
		T (°C)	P (bar)	T (°C)	P (bar)
R236ea	1	40,00	3,37	40,00	3,37
	2	41,17	23,69	41,17	23,69
	3	80,00	23,69	80,00	23,69
	4	120,00	23,69	120,00	23,69
	5	61,86	3,37	61,86	3,37
	6	40,00	3,37	40,00	3,37
Agua de camisas	7	85,00	3,00	85,00	3,00
	8	79,26	3,00	79,45	3,00
Therminol 55	9	175,00	1,00	175,00	1,00
	10	140,00	1,00	140,84	1,00
Agua de mar	11	25,00	1,00	25,00	1,00
	12	30,00	1,00	30,00	1,00

Tabla 8.1.1 - Datos de presión y temperatura teóricos para los puntos del ciclo subcrítico sin aire de barrido.

En este caso simulando con HYSYS se debe aplicar un Adjust solamente para regular el caudal de Therminol 55, ya que a partir de este parámetro y los introducidos anteriormente como condiciones de salida y entrada de los

intercambiadores el programa calcula por defecto el caudal másico del agua de refrigeración y el R236ea. Los caudales másicos y los valores de la potencia intercambiada y generada se muestran en la Tabla 8.1.2.

Parámetro	HYSYS	Aspen Plus	Unidades
Caudal másico de R236ea	15,53	15,53	kg/s
Caudal másico de agua de camisas	31,10	31,10	
Caudal másico de Therminol 55	25,69	25,42	
Caudal másico de agua de mar	124,81	124,81	
Potencia calorífica intercambiada en el calentador de agua de camisas	798,22	798,22	kW
Potencia calorífica intercambiada en el evaporador de Therminol 55	2153,92	2153,92	
Potencia calorífica intercambiada en el condensador.	2608,78	2608,78	
Potencia calorífica total suministrada al ciclo	2952,14	2952,14	
Trabajo neto del ciclo	302,04	302,04	
Rendimiento del ciclo	10,23	10,23	%

Tabla 8.1.2 - Caudales de los fluidos y potencias intercambiadas en el ciclo subcrítico sin aire de barrido.

8.2 Ciclo de 1234ze(E) sin aire de barrido

Las condiciones que debe cumplir la simulación del ciclo son las siguientes:

- El fluido de trabajo es el R1234ze(E).
- La temperatura de condensación es de 40 °C.
- La presión de descarga de la bomba debe ser de 43,5bar.
- El fluido de trabajo sale del intercambiador del agua de camisas a 80 °C.
- La diferencia mínima de temperaturas en el intercambiador de agua de camisas debe ser de 5 °C.
- Las condiciones de salida del intercambiador de Therminol 55 para el R1234ze(E) son 140 °C y título de vapor 1.
- La diferencia de temperatura mínima entre el Therminol 55 y el R236ea debe ser de 20 °C.
- La potencia calorífica cedida al R1234ze(E) por el agua de camisas no debe superar los 1730 kW.
- La potencia calorífica cedida por el Therminol 55 al fluido de trabajo será de 2153,92 kW.
- El rendimiento isoentrópico de la bomba y del turbina es 0,8 y su rendimientos electromecánicos de 0,85 y 0,9025 respectivamente.

En la Figura 8.4 se puede ver la simulación en Aspen Plus de el ciclo subcrítico sin aire.

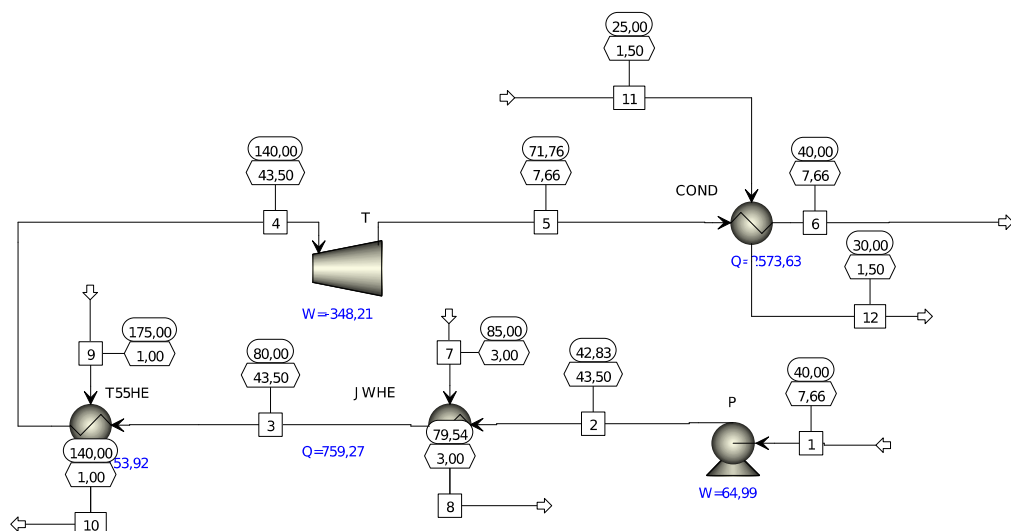


Figura 8.4 - Simulación de Aspen Plus del ciclo transcrito con R1234ze(E).

Los resultados obtenidos para las temperaturas y presiones de los fluidos para simulación de este ciclo tanto en HYSYS como en Aspen Plus se recopilan en la Tabla 8..1

Fluido	Puntos	HYSYS		Aspen Plus	
		T (°C)	P (bar)	T (°C)	P (bar)
R1234ze(E)	1	40,00	7,66	40,00	7,66
	2	42,83	43,5	42,83	43,5
	3	80,00	43,5	80,00	43,5
	4	140,00	43,5	140,00	43,5
	5	72,06	7,66	71,76	7,66
	6	40,00	7,66	40,00	7,66
Agua de Camisas	7	85,00	3,00	85,00	3,00
	8	79,52	3,00	79,54	3,00
Therminol 55	9	175,00	1,00	175,00	1,00
	10	140,00	1,00	140,00	1,00
Agua de mar	11	25,00	1,00	25,00	1,00
	12	30,00	1,00	30,00	1,00

Tabla 8.2.1 - Datos de presión y temperatura para los puntos del ciclo transcrito sin aire de barrido.

Se debe ajustar bien el caudal de R1234ze(E) para que se sigan cumpliendo los requisitos de la simulación. Los datos de los caudales circulantes por el ciclo y las potencias intercambiadas y generada se presentan en la Tabla 8.2.

Parámetro	HYSYS	Aspen Plus	Unidades
Caudal másico de R1234ze(E)	13,71	13,71	kg/s
Caudal másico de agua de camisas	31,10	31,10	
Caudal másico de Therminol 55	25,69	25,69	
Caudal másico de agua de mar	123,30	123,13	
Potencia calorífica intercambiada en el calentador de agua de camisas	759,25	759,26	kW
Potencia calorífica intercambiada en el evaporador de Therminol 55	2153,92	2159,92	
Potencia calorífica intercambiada en el condensador.	2577,94	2573,61	
Potencia calorífica total suministrada al ciclo	2913,17	2913,18	
Trabajo neto del ciclo	287,43	283,22	
Rendimiento del ciclo	9,87	9,72	%

Tabla 8.2.2 - Caudales de los fluidos y potencias intercambiadas en el ciclo transcrito sin aire de barrido.

9 DIMENSIONAMIENTO DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR

En el diseño de los intercambiadores se debe especificar la clase TEMA para establecer las condiciones de servicio en las que operan los intercambiadores. Se establecen tres clases: clase R para condiciones de servicio severas o en refinerías de petróleo e industrias relacionadas, clase C para condiciones de servicio moderadas o de procesos generales y clase B para condiciones de servicio relacionadas con la química en general [3]. En este caso, las condiciones vienen dadas por el ambiente de la sala de máquinas con lo cual se selecciona una clase TEMA C. También se especifica la norma para el código de diseño ASME Code Sec VIII Div 1. En cuanto a la clase de servicio, el programa ofrece las opciones de letal, de baja temperatura, o el que se emplea en estos diseños, servicio normal.

Se debe conocer la estructura que tendrán los intercambiadores, ya que TEMA establece diferentes tipos estándar de cabezales, carcasas y cierres, los cuales, dependiendo de sus características, tienen mejor o peor desempeño dependiendo del tipo de intercambiador que se quiera dimensionar [3], [13]. En la Figura 9.1 se pueden ver las diferentes partes estandarizadas.

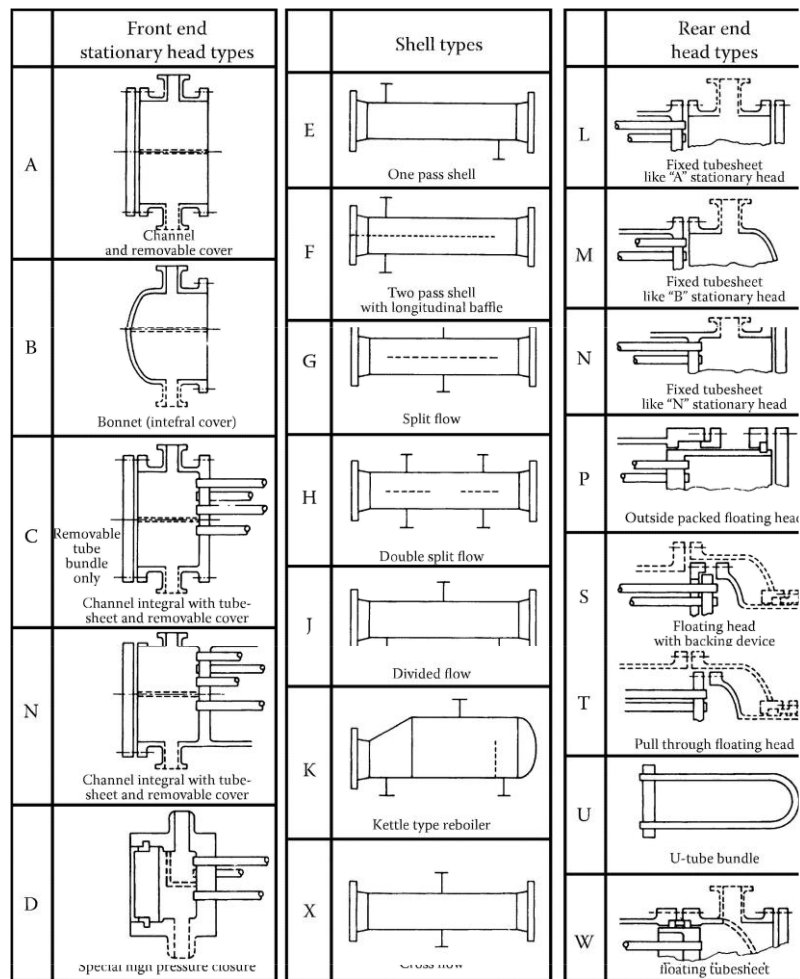


Figura 9.1 - Tipos estándar de cabezales delanteros y traseros y carcasa establecidos por TEMA. (Kakaç, S. Heat Exchangers)

Para los intercambiadores de agua de camisas con el fluido de trabajo, emplearemos un cabezal de tipo A, es el tipo de cabezal más empleado [3]. Para la carcasa se emplea una de tipo E, las cuales son sencillas, de un solo paso y están recomendadas para intercambiadores sin cambio de fase [3]. Como cabezal de cierre se utiliza uno de tipo N, el cual también es fijo, por lo que con este tipo de configuración, la limpieza de este intercambiador se debe realizar por medios químicos [3].

Para los intercambiadores de aire de barrido se usa un cabezal de tipo A, o como alternativa también se puede emplear otro cabezal tipo C, el cual a diferencia del anterior no está fijado permanentemente al cuerpo del intercambiador [3]. En este caso la carcasa será de tipo X, como se puede apreciar en la figura está indicada para flujo cruzado, lo que ayuda a que las pérdidas de carga sean muy leves [3]. Como cierre se elige un cabezal tipo S, su particularidad es que permite la limpieza

mecánica de las superficies del lado de la carcasa si el patrón de tubos seleccionado es el correcto [3].

Para el intercambiador de Therminol 55 se utiliza en el ciclo subcrítico un cabezal de tipo A y un cierre de tipo N. Para la carcasa emplearemos una de tipo F, siendo esta la única configuración que da como resultado un valor de título 1 a la salida del evaporador. En el caso del intercambiador del ciclo transcrito, el intercambio térmico se realiza entre dos corrientes en diferente fase por lo que seleccionaremos una carcasa de tipo X [3], [13].

El dimensionamiento de los intercambiadores de calor se realiza a partir de la simulación con las máximas pérdidas admisibles en cada intercambiador. Las condiciones que deben cumplir las simulaciones son las siguientes:

- Se establece una caída máxima de presión en cada intercambiador de 0.5 bar para el fluido de trabajo y los fluidos de calentamiento y refrigeración.
- La presión de entrada para el Therminol 55 y el agua de mar será suficiente para que estos no abandonen el intercambiador a una presión menor que la atmosférica.
- El fluido de trabajo circulará por el interior de los tubos en los intercambiadores, excepto en el condensador donde circulará por la carcasa.
- Los valores de coeficiente de fouling para cada fluido, empleados para el dimensionamiento de los intercambiadores de carcasa y tubo son los valores típicos establecidos por la normativa TEMA. Reflejados en la Tabla 9.1.
- Para el diseño de los intercambiadores no se asumen pérdidas de carga o de temperatura entre un intercambiador y el siguiente.

Las simulaciones de máximas pérdidas admisibles para cada intercambiador se realizan en Aspen Plus debido a que en la versión utilizada HYSYS no exporta las propiedades de las corrientes del fluido a Aspen EDR para poder realizar el dimensionamiento.

Fluido	Valor [13]	Unidades
R236ea	0.00018	(m ² ·K/W)
R1234ze(E)	0.00018	
Therminol 55	0.00018	
Agua de camisas	0.00018	
Aire de barrido	0.00018	
Agua de mar (por debajo de 50 °C)	0.00035	

Tabla 9.1 - Factores de fouling típicos aplicados a los intercambiadores de carcasa y tubos.

9.1 Funcionamiento del Aspen EDR

El dimensionamiento de los intercambiadores se lleva a cabo con el software Aspen EDR. Este calcula diferentes intercambiadores con diferentes dimensiones, hasta proporcionar uno con unas dimensiones específicas que cumpla los requisitos de funcionamiento preestablecidas.

Una vez realizada la simulación con las máximas pérdidas admisibles para cada intercambiador, con los flujos y potencias de intercambio ajustados, se exportan los parámetros de entrada y salida de cada intercambiador de Aspen plus a Aspen EDR para el dimensionamiento de este. El programa ofrece la posibilidad de prefijar cualquier dimensión del intercambiador como el número de tubos, la longitud de estos, el número de pasos etc. También es posible modificar el diseño del intercambiador una vez dimensionado si se quiere variar alguna de los parámetros de este.

9.2 Diseño de los intercambiadores del ciclo subcrítico de R236ea

A partir de los datos termodinámicos del circuito subcrítico simulado con las máximas pérdidas admisibles se dimensionan los intercambiadores de calor obteniendo las condiciones de funcionamiento para cada intercambiador.

9.2.1 Simulación con máximas pérdidas admisibles

En la Figura 9.2.1.1 se muestra la simulación en Aspen Plus para el ciclo subcrítico de R236ea con intercambiador de aire de barrido.

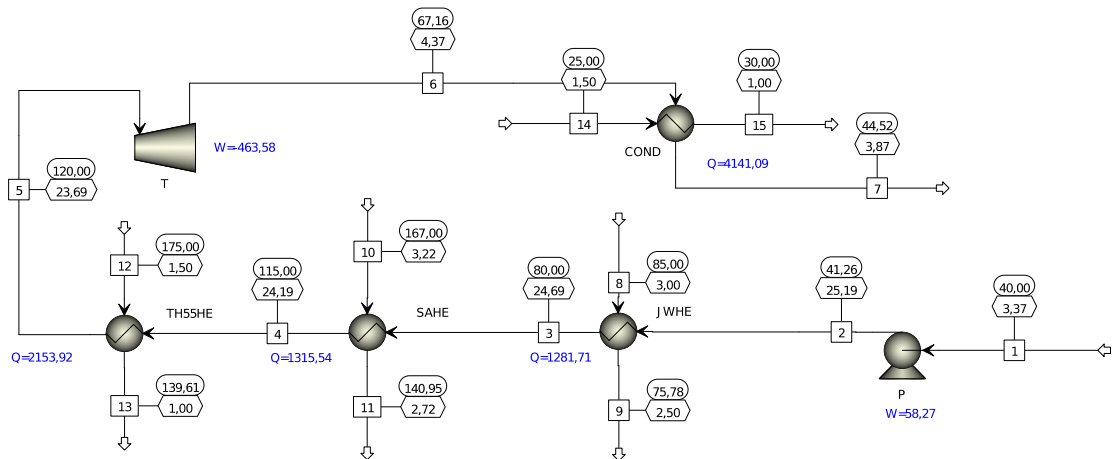


Figura 9.2.1.1 - Simulación del ciclo de R236ea con aire de barrido, pérdidas máximas admisibles

Los resultados de la simulación con los valores de los diferentes puntos del circuito se muestran en la Tabla 9.2.1.1.

Fluido	Puntos	T (°C)	P (bar)
R236ea	1	40,00	3,37
	2	41,26	25,19
	3	80	24,69
	4	115	24,19
	5	120	23,69
	6	67,16	3,87
	7	40,00	3,37
Agua de Camisas	8	85,00	3,00
	9	75,78	2,50
Aire de barrido	10	167,00	3,22
	11	140,95	2,77
Therminol 55	12	175,00	1,50
	13	139,61	1,00
Agua de mar	14	25,00	1,50
	15	30,00	1,00

Tabla 9.2.1.1 - Datos de las corrientes de la simulación de máximas pérdidas admisibles del ciclo subcrítico con R236ea con aire de barrido.

En la Tabla 9.2.1.2 se muestran los valores de las corrientes de los fluidos, las potencias intercambiadas en los intercambiadores y la potencia neta mínima que podría ser desarrollada por el ciclo subcrítico con aire de barrido.

Parámetro	Valor	Unidades
Caudal másico de R236ea	25,01	kg/s
Caudal másico de agua de camisas	33,10	
Caudal másico del aire de barrido	49,89	
Caudal másico de Therminol 55	25,42	
Caudal másico de agua de mar	198,56	
Potencia calorífica intercambiada en el calentador de agua de camisas	1 281,71	kW
Potencia calorífica intercambiada en el calentador de aire de barrido	1 315,54	
Potencia calorífica intercambiada en el evaporador de Therminol 55	2 153,92	
Potencia calorífica intercambiada en el condensador.	4 141,09	
Potencia calorífica total suministrada al ciclo	4 751,17	
Trabajo neto mínimo del ciclo	405,31	
Rendimiento mínimo teórico del ciclo	8,83	%

Tabla 9.2.1.2 - Caudales y potencias obtenidos en la simulación con las máximas pérdidas admisibles para el ciclo subcrítico con aire de barrido.

9.2.2 Dimensionamiento de los equipos

En la Tabla 9.2.2.1 se reflejan los datos obtenidos para el intercambiador de agua de camisas.

Parámetro	Agua de camisas (Entrada / Salida)		R236ea (Entrada / Salida)		Unidades
Flujo másico total	33,10		25,01		kg/s
Caudal másico de vapor	0	0	0	0	
Caudal másico de líquido	33,10	33,10	25,01	25,01	
Temperaturas (entrada/salida)	85,0	75,75	41,26	80,11	°C
Presión	3,00	2,91	25,19	25,15	bar
Coeficiente de película	5 362,90		286,00		W/(m ² ·K)
Resistencia a fouling	0,00018		0,00023		m ² ·K/W
Velocidad más alta	0,36		0,15		m/s
Pérdida de presión (permitida/calculada)	0,50	0,09	0,50	0,04	bar
Calor total intercambiado	1 285,30				kW
Coeficiente de transferencia limpio	268,10				W/(m ² ·K)
Coeficiente de transferencia sucio	242,00				W/(m ² ·K)
Superficie efectiva	356,20				m ²
DMT efectiva	14,92				°C

Tabla 9.2.2.1 - Parámetros de funcionamiento del intercambiador de agua de camisas del circuito subcrítico.

Los parámetros de funcionamiento del intercambiador de aire de barrido se representan en la Tabla 9.2.2.2.

Parámetro	Aire de barrido (Entrada / Salida)		R236ea (Entrada / Salida)		Unidades
	Flujo másico total	49,89		25,01	
Caudal másico de vapor	49,89	49,89	0	0	
Caudal másico de líquido	0	0	25,01	25,01	
Temperaturas (entrada/salida)	167,00	140,72	80,11	115,44	°C
Presión	3,22	2,90	24,69	24,65	bar
Coeficiente de película	603,10		301,10		W/(m ² ·K)
Resistencia a fouling	0,00018		0,00023		m ² ·K/W
Velocidad más alta	42,44		0,16		m/s
Pérdida de presión (permitida/calculada)	0,50	0,32	0,50	0,05	bar
Calor total intercambiado	1 328,40				kW
Coeficiente de transferencia limpio	198,90				W/(m ² ·K)
Coeficiente de transferencia sucio	184,20				W/(m ² ·K)
Superficie efectiva	135,90				m ²
DMT efectiva	53,07				°C

Tabla 9.2.2.2 - Parámetros de funcionamiento del intercambiador de aire de barrido del ciclo subcrítico.

En el evaporador el calor cedido por el Therminol 55 se emplea mayormente en la vaporización del R236ea, el cual abandona el intercambiador en condiciones de vapor saturado. En la Tabla 9.2.2.3 se recogen los datos de funcionamiento de este intercambiador.

Parámetro	Therminol 55 (Entrada / Salida)		R236ea (Entrada / Salida)		Unidades
Flujo másico total	25,42		25,01		kg/s
Caudal másico de vapor	0	0	0	25,0066	
Caudal másico de líquido	25,42	25,42	25,01	0	
Temperaturas (entrada/salida)	175,00	139,32	115,00	121,17	°C
Presión	1,50	1,17	24,19	24,10	bar
Coeficiente de película	1 574,10		1 717,70		W/(m ² ·K)
Resistencia a fouling	0,00018		0,00023		m ² ·K/W
Velocidad más alta	0,92		3,12		m/s
Pérdida de presión (permitida/calculada)	0,50	0,33	0,50	0,09	bar
Calor total intercambiado	2 170,90				kW
Coeficiente de transferencia limpio	790,40				W/(m ² ·K)
Coeficiente de transferencia sucio	599,80				W/(m ² ·K)
Superficie efectiva	101,50				m ²
DMT efectiva	35,66				°C

Tabla 9.2.2.3 - Parámetros de funcionamiento del evaporador de Therminol 55 en el ciclo subcrítico con aire de barrido.

Al condensador llega el fluido de trabajo tras la descarga de la turbina. En este se condensa para volver a comenzar el ciclo. Los datos de funcionamiento de este equipo se muestran en la Tabla 9.2.2.4.

Parámetro	Agua de mar (Entrada / Salida)		R236ea (Entrada / Salida)		Unidades
	Flujo másico total	209,45		25,01	
Caudal másico de vapor	0	0	25,01	0	
Caudal másico de líquido	209,45	209,45	0	25,01	
Temperaturas (entrada/salida)	25,00	29,86	64,64	39,80	°C
Presión	1,50	1,33	3,87	3,84	bar
Coeficiente de película	4 549,70		1 157,80		W/(m ² ·K)
Resistencia a fouling	0,00023		0,00018		m ² ·K/W
Velocidad más alta	1,25		3,27		m/s
Pérdida de presión (permitida/calculada)	0,50	0,17	0,50	0,04	bar
Calor total intercambiado	4 253,20				kW
Coeficiente de transferencia limpio	886,00				W/(m ² ·K)
Coeficiente de transferencia sucio	653,30				W/(m ² ·K)
Superficie efectiva	422,30				m ²
DMT efectiva	15,42				°C

Tabla 9.2.2.4 - Parámetros de funcionamiento del condensador del circuito subcrítico con aire de barrido.

9.3 Diseño de los intercambiadores del ciclo transcrito de R1234ze(E)

Se realiza la simulación del ciclo para posteriormente emplear los datos obtenidos de ella en el dimensionamiento de los intercambiadores.

9.3.1 Simulación con máximas pérdidas admisibles

En la Figura 9.3.1.1 se muestra la simulación en Aspen Plus para el ciclo transcrito de R1234ze(E) con intercambiador de aire de barrido.

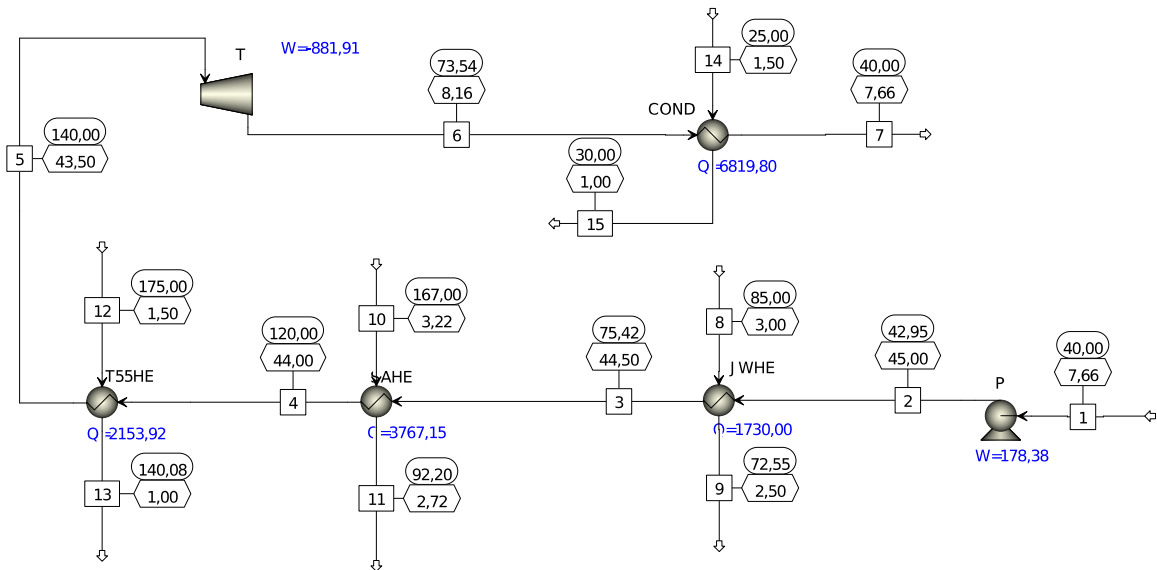


Figura 9.3.1.1 - Simulación con máximas pérdidas admisibles ciclo R1234ze(E) sin aire de barrido.

Los resultados de la simulación con los valores de los diferentes puntos del circuito se muestran en la Tabla 9.3.1.1.

Fluido	Puntos	T (°C)	P (bar)
R1234ze(E)	1	40,00	7,66
	2	42,95	45,00
	3	75,42	44,50
	4	120,00	44,00
	5	140,00	43,50
	6	73,54	8,16
	7	40,00	7,66
Agua de Camisas	8	85,00	3,00
	9	72,55	2,50
Aire de barrido	10	167,00	3,22
	11	92,20	2,77
Therminol 55	12	175,00	1,50
	13	140,08	1,00
Agua de mar	14	25,00	1,50
	15	30,00	1,00

Tabla 9.3.1.1 - Datos de las corrientes de la simulación de máximas pérdidas admisibles del ciclo transcrito con aire de barrido.

9.3.2 Dimensionamiento de los equipos

En la Tabla 9.3.2.1 se muestran los valores de las corrientes de los fluidos, las potencias intercambiadas en los intercambiadores y la potencia neta mínima que podría ser desarrollada por el ciclo subcrítico con aire de barrido.

Parámetro	Valor	Unidades
Caudal másico de R1234ze(E)	36,11	kg/s
Caudal másico de agua de camisas	33,10	
Caudal másico del aire de barrido	49,89	
Caudal másico de Therminol 55	25,75	
Caudal másico de agua de mar	326,97	
Potencia calorífica intercambiada en el calentador de agua de camisas	1 730,00	kW
Potencia calorífica intercambiada en el calentador de aire de barrido	3 767,15	
Potencia calorífica intercambiada en el evaporador de Therminol 55	2 153,92	
Potencia calorífica intercambiada en el condensador.	6 819,80	
Potencia calorífica total suministrada al ciclo	7 651,07	
Trabajo neto mínimo del ciclo	703,53	
Rendimiento mínimo teórico del ciclo	9,20	%

Tabla 9.3.2.1 - Caudales y potencias obtenidos de la simulación del ciclo transcrito con aire de barrido.

El circuito transcrito alcanza mayores presiones y temperaturas, esto provoca un encarecimiento de los equipos de intercambio de calor. Los resultados de funcionamiento mediante la simulación realizada en Aspen EDR del intercambiador de agua de camisas se muestran en la Tabla 9.3.2.2.

Parámetro	Agua de camisas (Entrada / Salida)		R1234ze(E) (Entrada / Salida)		Unidades
Flujo másico total	33,10		36,28		kg/s
Caudal másico de vapor	0	0	0	0	
Caudal másico de líquido	33,10	33,10	36,28	36,28	
Temperaturas (entrada/salida)	85,0	75,75	42,95	75,32	°C
Presión	3,00	2,73	45,00	44,95	bar
Coeficiente de película	8 390,30		910,50		W/(m ² ·K)
Resistencia a fouling	0,00018		0,00023		m ² ·K/W
Velocidad más alta	0,56		0,60		m/s
Pérdida de presión (permitida/calculada)	0,50	0,27	0,50	0,05	bar
Calor total intercambiado	1 731,50				kW
Coeficiente de transferencia limpio	791,20				W/(m ² ·K)
Coeficiente de transferencia sucio	600,30				W/(m ² ·K)
Superficie efectiva	164,40				m ²
DMT efectiva	17,55				°C

Tabla 9.3.2.2 - Parámetros de funcionamiento del intercambiador de agua de camisas del ciclo transcrito con aire de barrido.

En la Tabla 9.3.2.3 se recogen los parámetros de funcionamiento del intercambiador de aire de barrido. En este se produce el cambio de estado del fluido de trabajo en este ciclo.

Parámetro	Aire de barrido (Entrada / Salida)		R1234ze(E) (Entrada / Salida)		Unidades
Flujo másico total	49,89		36,28		kg/s
Caudal másico de vapor	49,89	49,89	0	36,28	
Caudal másico de líquido	0	0	36,28	0	
Temperaturas (entrada/salida)	167	92,31	75,28	120,28	°C
Presión	3,22	3,16	44,5	44,41	bar
Coeficiente de película	220,3		160,9		W/(m ² ·K)
Resistencia a fouling	0,00018		0,00023		m ² ·K/W
Velocidad más alta	8,72		0,86		m/s
Pérdida de presión (permitida/calculada)	0,50	0,06	0,50	0,09	bar
Calor total intercambiado	3 761,20				kW
Coeficiente global de transferencia limpio	174,20				W/(m ² ·K)
Coeficiente global de transferencia sucio	162,80				W/(m ² ·K)
Superficie efectiva	1 025,20				m ²
DMT efectiva	22,53				°C

Tabla 9.3.2.3 - Parámetros de funcionamiento del intercambiador de aire de barrido del ciclo transcrito con aire de barrido.

En este ciclo en el intercambiador de Therminol 55 con el fluido de trabajo, el intercambio térmico ocurre entre dos fluidos en fase gas, las condiciones de salida de este equipo serán las condiciones de entrada a la turbina. En la Tabla 9.3.2.4 se recogen los parámetros de funcionamiento del intercambiador.

Parámetro	Therminol 55 (Entrada / Salida)		R1234ze(E) (Entrada / Salida)		Unidades
Flujo másico total	25,78		36,28		kg/s
Caudal másico de vapor	0	0	36,28	36,28	
Caudal másico de líquido	25,78	25,78	0	0	
Fracción de vapor	0	0	1	1	
Temperaturas (entrada/salida)	175,00	139,91	120,00	140,15	°C
Presión	1,50	1,17	44,00	43,66	bar
Coefficiente de película	1 473,70		3 066,10		W/(m ² ·K)
Resistencia a fouling	0,00018		0,00023		m ² ·K/W
Velocidad más alta	1,12		5,10		m/s
Pérdida de presión (permitida/calculada)	0,50	0,33	0,50	0,34	bar
Calor total intercambiado	2 167,10				kW
Coefficiente de transferencia limpio	949,90				W/(m ² ·K)
Coefficiente de transferencia sucio	687,40				W/(m ² ·K)
Superficie efectiva	108,60				m ²
DMT efectiva	29,03				°C

Tabla 9.3.2.4 - Parámetros de funcionamiento del intercambiador de Therminol 55 del ciclo transcrito con aire de barrido.

En el condensador, alimentado por agua de mar el fluido vuelve a las condiciones del estado inicial para volver a recorrer el ciclo. Las condiciones de funcionamiento del condensador se recogen en la Tabla 9.3.2.5.

Parámetro	Agua de mar (Entrada / Salida)		R1234ze(E) (Entrada / Salida)		Unidades
	Flujo másico total	340,97		36,28	
Caudal másico de vapor	0	0	36,28	0	
Caudal másico de líquido	340,97	340,97	0	36,28	
Temperaturas (entrada/salida)	25,00	30,00	73,54	35,00	°C
Presión	1,50	1,10	8,16	8,11	bar
Coeficiente de película	6 065,80		1 157,50		W/(m ² ·K)
Resistencia a fouling	0,00045		0,00018		m ² ·K/W
Velocidad más alta	1,83		2,87		m/s
Pérdida de presión (permitida/calculada)	0,50	0,40	0,50	0,05	bar
Calor total intercambiado	7 110,70				kW
Coeficiente global de transferencia limpio	930,40				W/(m ² ·K)
Coeficiente global de transferencia sucio	587,30				W/(m ² ·K)
Superficie efectiva	773,70				m ²
DMT efectiva	13,44				°C

Tabla 9.3.2.5 - Parámetros de funcionamiento del condensador del ciclo transcrito con aire de barrido.

9.4 Dimensionamiento de los intercambiadores del ciclo subcrítico de R236ea sin aire de barrido

El dimensionamiento de los intercambiadores de los ciclos que no aprovechan el calor residual del aire de barrido se realiza bajo las mismas condiciones y mediante el mismo procedimiento que los ciclos que si aprovechan esta energía.

9.4.1 Simulación con máximas pérdidas admisibles

En la Figura 9.3.1.1 se muestra la simulación en Aspen Plus para el ciclo transcrito de R236ea sin intercambiador de aire de barrido.

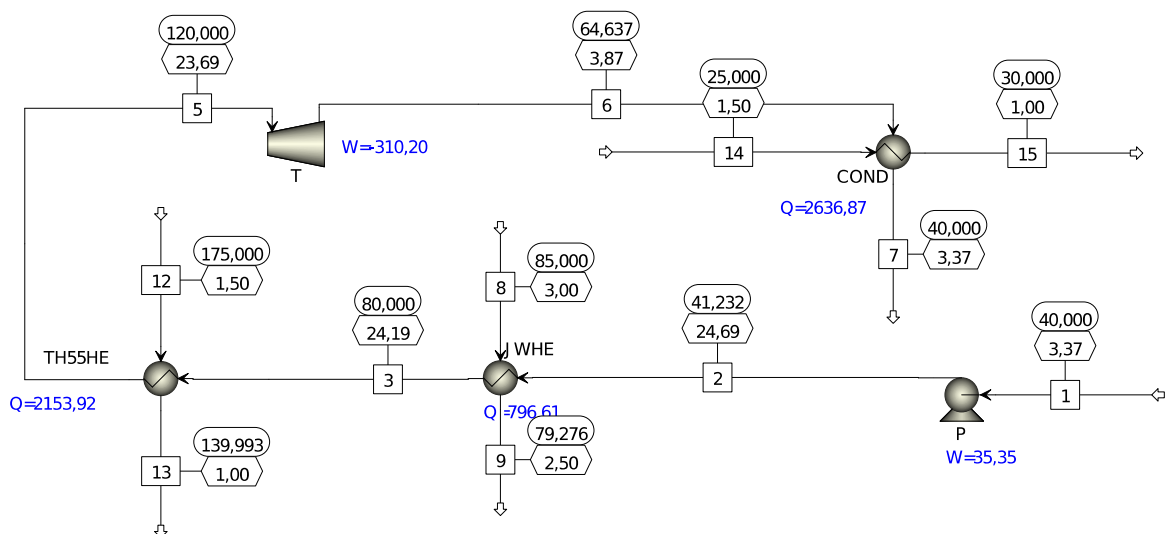


Figura 9.3.1.1 - Simulación con las máximas pérdidas admisibles para el ciclo subcrítico sin aire de barrido.

Los resultados de la simulación con los valores de los diferentes puntos del circuito se muestran en la Tabla 9.4.1.1.

Fluido	Puntos	T (°C)	P (bar)
R236ea	1	40,00	3,37
	2	41,23	24,69
	3	80,00	24,19
	4	120,00	23,69
	5	64,64	3,87
	6	40,00	3,37
Agua de Camisas	8	85,00	3,00
	9	79,28	2,50
Therminol 55	12	175,00	1,50
	13	139,99	1,00
Agua de mar	14	25,00	1,50
	15	30,00	1,00

Tabla 9.4.1.1 - Datos de las corrientes de la simulación de máximas pérdidas admisibles del ciclo subcrítico sin aire de barrido.

En la Tabla 9.4.1.2 se muestran los valores de las corrientes de los fluidos , las potencias intercambiadas en los intercambiadores y la potencia neta mínima que podría ser desarrollada por el ciclo subcrítico con aire de barrido.

Parámetro	Valor	Unidades
Caudal másico de R236ea	15,53	kg/s
Caudal másico de agua de camisas	33,10	
Caudal másico de Therminol 55	25,69	
Caudal másico de agua de mar	126,43	
Potencia calorífica intercambiada en el calentador de agua de camisas	796,61	kW
Potencia calorífica intercambiada en el evaporador de Therminol 55	2 153,92	
Potencia calorífica intercambiada en el condensador.	2 636,87	
Potencia calorífica total suministrada al ciclo	2 950,53	
Trabajo neto mínimo del ciclo	274,85	
Rendimiento mínimo teórico del ciclo	9,32	%

Tabla 9.4.1.2 - Caudales y potencias obtenido en la simulación con las máximas pérdidas admisibles para el ciclo subcrítico sin aire de barrido.

9.4.2 Dimensionamiento de los equipos

Los parámetros principales del calentador de agua de camisas del ciclo subcrítico sin aire de barrido se presentan en la Tabla 9.4.2.3.

Parámetro	Agua de camisas (Entrada / Salida)		R236ea (Entrada / Salida)		Unidades
Flujo másico total	31,10		15,53		kg/s
Caudal másico de vapor	0	0	0	0	
Caudal másico de líquido	31,10	31,10	15,53	15,53	
Temperaturas (entrada/salida)	85,00	79,19	41,23	80,50	°C
Presión	3,00	2,91	24,69	24,50	bar
Coeficiente de película	7 660,80		1 084,30		W/(m ² ·K)
Resistencia a fouling	0,00018		0,00023		m ² ·K/W
Velocidad más alta	0,48		0,88		m/s
Pérdida de presión (permitida/calculada)	0,50	0,09	0,50	0,18	bar
Calor total intercambiado	807,40				kW
Coeficiente global de transferencia limpio	909,70				W/(m ² ·K)
Coeficiente global de transferencia sucio	666,10				W/(m ² ·K)
Superficie efectiva	106,10				m ²
DMT efectiva	11,43				°C

Tabla 9.4.2.3 - Parámetros de funcionamiento para el intercambiador de agua de camisas del ciclo subcrítico sin aire de barrido.

El fluido de trabajo se evapora en el intercambiador de Therminol 55, los datos de funcionamiento de este equipo se recogen en la Tabla 9.4.2.2.

Parámetro	Therminol 55 (Entrada / Salida)		R236ea (Entrada / Salida)		Unidades
Flujo másico total	24,42		15,53		kg/s
Caudal másico de vapor	0	0	0	15,53	
Caudal másico de líquido	25,42	25,42	15,53	0	
Temperaturas (entrada/salida)	175,00	139,47	80,00	120,82	°C
Presión	1,50	1,08	24,19	23,97	bar
Coeficiente de película	1 765,60		1 937,00		W/(m ² ·K)
Resistencia a fouling	0,00018		0,00023		m ² ·K/W
Velocidad más alta	1,06		4,48		m/s
Pérdida de presión (permitida/calculada)	0,50	0,42	0,50	0,22	bar
Calor total intercambiado	2 162,30				kW
Coeficiente global de transferencia limpio	885,00				W/(m ² ·K)
Coeficiente global de transferencia sucio	652,70				W/(m ² ·K)
Superficie efectiva	71,80				m ²
DMT efectiva	46,11				°C

Tabla 9.4.2.2 - Datos de funcionamiento del intercambiador de Therminol 55 del ciclo subcrítico sin aire de barrido.

Los datos de funcionamiento de diseño del condensador para este ciclo se presentan en la Tabla 9.4.2.3.

Parámetro	Agua de mar (Entrada / Salida)		R236ea (Entrada / Salida)		Unidades
	Flujo másico total	122,17		15,53	
Caudal másico de vapor	0	0	0	15,53	
Caudal másico de líquido	122,17	122,17	15,53	0	
Temperaturas (entrada/salida)	25,00	30,18	64,64	39,87	°C
Presión	1,50	1,23	3,87	3,84	bar
Coefficiente de película	5 131,70		1 011,20		W/(m ² ·K)
Resistencia a fouling	0,00045		0,00018		m ² ·K/W
Velocidad más alta	1,48		2,35		m/s
Pérdida de presión (permitida/calculada)	0,50	0,027	0,50	0,03	bar
Calor total intercambiado	2 640,10				kW
Coefficiente global de transferencia limpio	813,20				W/(m ² ·K)
Coefficiente global de transferencia sucio	537,90				W/(m ² ·K)
Superficie efectiva	319,10				m ²
DMT efectiva	15,38				°C

Tabla 9.4.2.3 - Parámetros de funcionamiento del condensador del ciclo subcrítico sin aire de barrido.

9.5 Dimensionamiento de los intercambiadores del ciclo transcrito de R1234ze(E) sin aire de barrido

En este ciclo, como carece de intercambiador de aire de barrido, el cambio de fase tendrá lugar en el intercambiador de Therminol 55 igual que en el ciclo subcrítico.

9.5.1 Simulación con máximas pérdidas admisibles

En la Figura 9.4.1.1 se muestra la simulación en Aspen Plus para el ciclo transcrito de R1234ze(E) con intercambiador de aire de barrido.

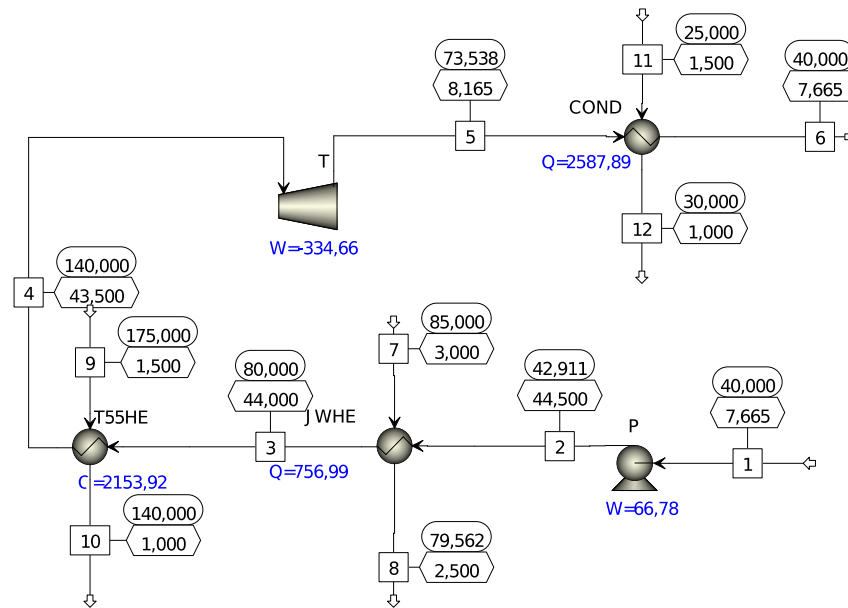


Figura 9.4.1.1 - Simulación con las máximas pérdidas admisibles para el ciclo transcrito sin aire de barrido.

Los resultados de la simulación con los valores de los diferentes puntos del circuito se muestran en la Tabla 9.5.1.4.

Fluido	Puntos	T (°C)	P (bar)
R1234ze(E)	1	40,00	7,67
	2	42,91	44,50
	3	80,00	44,00
	4	140,00	43,50
	5	73,54	8,17
	6	40,00	7,67
Agua de Camisas	8	85,00	3,00
	9	79,56	2,50
Therminol 55	12	175,00	1,50
	13	140,00	1,00
Agua de mar	14	25,00	1,50
	15	30,00	1,00

Tabla 9.5.1.4 - Datos de las corrientes de la simulación de máximas pérdidas admisibles del ciclo transcrítico sin aire de barrido.

En la Tabla 9.5.1.5 se muestran los valores de las corrientes de los fluidos, las potencias intercambiadas en los intercambiadores y la potencia neta mínima que podría ser desarrollada por este ciclo.

Parámetro	Valor	Unidades
Caudal másico de R236ea	13,70	kg/s
Caudal másico de agua de camisas	33,10	
Caudal másico de Therminol 55	25,69	
Caudal másico de agua de mar	124,08	
Potencia calorífica intercambiada en el calentador de agua de camisas	756,99	kW
Potencia calorífica intercambiada en el evaporador de Therminol 55	2 153,92	
Potencia calorífica intercambiada en el condensador.	2 587,89	
Potencia calorífica total suministrada al ciclo	2 910,91	
Trabajo neto mínimo del ciclo	267,88	
Rendimiento mínimo teórico del ciclo	9,20	%

Tabla 9.5.1.5 - Caudales y potencias obtenidos de la simulación del ciclo transcrito sin aire de barrido.

9.5.2 Dimensionamiento de los equipos

Se diseñan también los intercambiadores de calor del ciclo transcrito, para luego realizar la simulación del ciclo real en HYSYS. En la Tabla 9.5.6 se muestran los parámetros de funcionamiento correspondientes al intercambiador de agua de camisas.

Parámetro	Agua de camisas (Entrada / Salida)		R1234ze(E) (Entrada / Salida)		Unidades
Flujo másico total	31,10		13,74		kg/s
Caudal másico de vapor	0	0	0	0	
Caudal másico de líquido	31,10	31,10	13,74	13,74	
Temperaturas (entrada/salida)	85,00	79,54	42,91	80,02	°C
Presión	3,00	2,82	44,5	44,11	bar
Coeficiente de película	9 914,50		1 952,40		W/(m ² ·K)
Resistencia a fouling	0,00018		0,00023		m ² ·K/W
Velocidad más alta	0,63		1,72		m/s
Pérdida de presión (permitida/calculada)	0,5	0,18	0,5	0,39	bar
Calor total intercambiado	759,00				kW
Coeficiente global de transferencia limpio	1 516,10				W/(m ² ·K)
Coeficiente global de transferencia sucio	942,00				W/(m ² ·K)
Superficie efectiva	66,50				m ²
DMT efectiva	12,13				°C

Tabla 9.5.6 - Parámetros de funcionamiento para el intercambiador de agua de camisas del ciclo transcrito sin aire de barrido.

En la Tabla 9.5.7 se muestran los datos del intercambiador alimentado con Therminol 55 para elevar la temperatura del fluido de trabajo hasta la temperatura de entrada a la turbina.

Parámetro	Therminol 55 (Entrada / Salida)		R1234ze(E) (Entrada / Salida)		Unidades
Flujo másico total	25,69		13,74		kg/s
Caudal másico de vapor	0	0	0	13,74	
Caudal másico de líquido	25,69	25,69	13,74	0	
Temperaturas (entrada/salida)	175	140,11	80,0	140,11	°C
Presión	1,50	1,18	44,00	43,86	bar
Coefficiente de película	1 622,30		1 798,5		W/(m ² ·K)
Resistencia a fouling	0,00018		0,00023		m ² ·K/W
Velocidad más alta	0,94		2,78		m/s
Pérdida de presión (permitida/calculada)	0,5	0,31	0,5	0,13	bar
Calor total intercambiado	2 147,5				kW
Coefficiente global de transferencia limpio	819,70				W/(m ² ·K)
Coefficiente global de transferencia sucio	616,50				W/(m ² ·K)
Superficie efectiva	82				m ²
DMT efectiva	42,46				°C

Tabla 9.5.7 - Parámetros de funcionamiento para el evaporador de Therminol 55 del ciclo transcrítico sin aire de barrido.

Los datos correspondientes al funcionamiento del condensador del circuito transcrítico sin intercambiador de aire de barrido se muestran en la Tabla 9.5.8.

Parámetro	Agua de mar (Entrada / Salida)		R1234ze(E) (Entrada / Salida)		Unidades
Flujo másico total	129,14		13,74		kg/s
Caudal másico de vapor	0	0	13,74	0	
Caudal másico de líquido	129,14	129,14	0	13,74	
Temperaturas (entrada/salida)	25,00	29,98	73,54	37,87	°C
Presión	1,50	1,29	8,16	8,12	bar
Coeficiente de película	4 601,50		1 074,30		W/(m ² ·K)
Resistencia a fouling	0,00045		0,00018		m ² ·K/W
Velocidad más alta	1,28		1,85		m/s
Pérdida de presión (permitida/calculada)	0,50	0,21	0,50	0,04	bar
Calor total intercambiado	2 636,40				kW
Coeficiente global de transferencia limpio	837,40				W/(m ² ·K)
Coeficiente global de transferencia sucio	548,80				W/(m ² ·K)
Superficie efectiva	351,70				m ²
DMT efectiva	13,68				°C

Tabla 9.5.8 - Parámetros de funcionamiento para el condensador del ciclo transcrito sin aire de barrido.

10 SIMULACIÓN REAL DE LOS CICLOS

Los intercambiadores dimensionados se implementan en la simulación del ciclo en el entorno de trabajo de HYSYS. Las pérdidas de presión producidas son compensadas aumentando la presión de descarga de la bomba para mantener las condiciones del fluido de trabajo a la entrada de la turbina, y los caudales máxicos de los fluidos son corregidos nuevamente para el correcto funcionamiento de las simulaciones. Se añade el bloque Recycle para igualar las condiciones del último punto del ciclo con el primero, es decir, igualar las condiciones de salida del condensador con las de llegada a la bomba para el fluido de trabajo.

Este paso no se puede realizar en Aspen Plus V12.0, un error se reporta en el intercambiador de Therminol 55 cuando se efectúa la simulación que imposibilita la obtención de resultados mediante este programa.

10.1 Ciclo subcrítico de R236ea

El entorno de simulación de HYSYS se muestra en la Figura 10.1.1 para el ciclo subcrítico con aire de barrido.

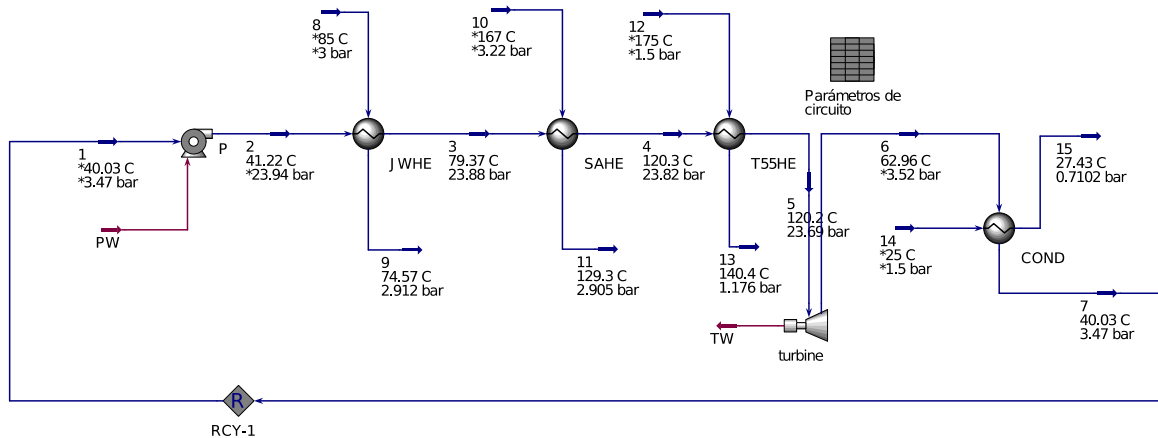


Figura 10.1.1 - Ciclo real de R236ea con aire de barrido.

En la Tabla 10.1.1 se recogen los datos de presión y temperatura a los que se encuentran los fluidos en los diferentes puntos del circuito.

Fluido	Puntos	T (°C)	P (bar)
R236ea	1	40,38	3,47
	2	41,56	23,94
	3	79,42	23,88
	4	120,3	23,82
	5	121,1	23,69
	6	64,48	3,52
	7	40,38	3,47
Agua de Camisas	8	85,00	3,00
	9	74,65	2,91
Aire de barrido	10	167,00	3,22
	11	129,30	2,91
Therminol 55	12	175,00	1,50
	13	141,30	1,15
Agua de mar	14	25,00	2,00
	15	29,95	1,21

Tabla 10.1.1 - Resultados de la simulación del ciclo subcrítico con aire de barrido con los intercambiadores dimensionados.

Los datos correspondientes a los caudales de los fluidos del circuito, las potencias caloríficas intercambiadas en los intercambiadores y la potencia neta del circuito se muestran en la Tabla 10.1.2.

Parámetro	Valor	Unidades
Caudal másico de R236ea	28,70	kg/s
Caudal másico de agua de camisas	33,10	
Caudal másico de aire de barrido	49,89	
Caudal másico de Therminol 55	26,63	
Caudal másico de agua de mar	481,00	
Potencia calorífica intercambiada en el calentador de agua de camisas	1 437,57	kW
Potencia calorífica intercambiada en el calentador de aire de barrido	1 906,51	
Potencia calorífica intercambiada en el evaporador de Therminol 55	2 153,92	
Potencia calorífica intercambiada en el condensador.	4 870,98	
Potencia calorífica total suministrada al ciclo	5 498,00	
Trabajo neto del ciclo	549,79	
Rendimiento teórico del ciclo	10,00	%

Tabla 10.1.2 - Caudales y potencias del ciclo subcrítico con aire de barrido con los intercambiadores dimensionados.

10.2 Ciclo transcrito de R1234ze(E)

La simulación real del ciclo transcrito con aire de barrido se muestra en la Figura 10.2.1.

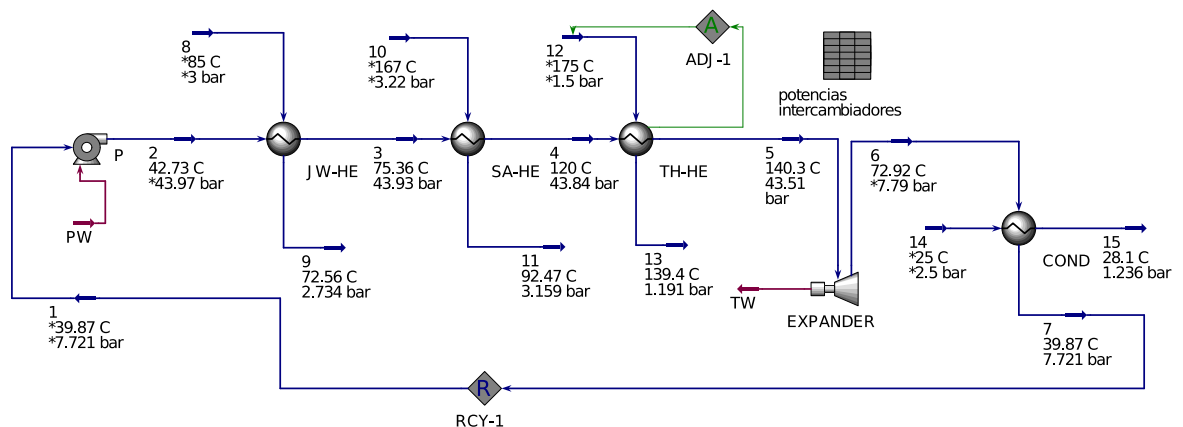


Figura 10.2.1 – Ciclo real transcrito con intercambiador de aire de barrido.

Los datos obtenidos de esta simulación se recogen en la Tabla 10.2.1

Fluido	Puntos	T (°C)	P (bar)
R1234ze(E)	1	39,87	7,72
	2	42,73	43,97
	3	75,36	43,93
	4	120,00	43,84
	5	140,30	43,51
	6	72,92	7,72
	7	39,87	7,66
Agua de Camisas	8	85,00	3,00
	9	72,56	2,73
Aire de barrido	10	167,00	3,22
	11	92,47	3,16
Therminol 55	12	175,00	1,50
	13	139,40	1,19
Agua de mar	14	25,00	2,50
	15	28,10	1,24

Tabla 10.2.1 - Datos de presión y temperatura del ciclo transcrito simulado con los intercambiadores dimensionados

Los datos correspondientes a los caudales y potencias obtenidos, así como el rendimiento del ciclo y la potencia neta desarrollada por este figuran en la Tabla 10.2.2.

Parámetro	Valor	Unidades
Caudal másico de R1234ze(E)	35,88	kg/s
Caudal másico de agua de camisas	31,10	
Caudal másico de aire de barrido	49,89	
Caudal másico de Therminol 55	25,17	
Caudal másico de agua de mar	634,04	
Potencia calorífica intercambiada en el calentador de agua de camisas	1 727,69	kW
Potencia calorífica intercambiada en el calentador de aire de barrido	3 763,75	
Potencia calorífica intercambiada en el evaporador de Therminol 55	2 153,92	
Potencia calorífica intercambiada en el condensador.	7 463,69	
Potencia calorífica total suministrada al ciclo	7 645,36	
Trabajo neto del ciclo	747,60	
Rendimiento del ciclo	9,78	%

Tabla 10.2.2 - Caudales y potencias obtenidas de la simulación del ciclo transcrito con los intercambiadores dimensionados.

10.3 Ciclo subcrítico de R236ea sin aire de barrido

El entorno de simulación de HYSYS se muestra en la Figura 10.3.1 para el ciclo subcrítico con aire de barrido

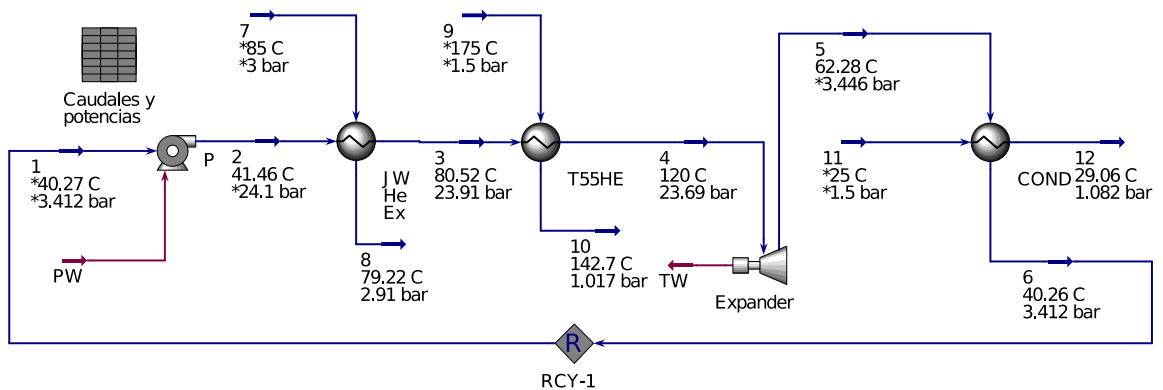


Figura 10.3.1 - Simulación real del ciclo subcrítico sin aire de barrido.

Una vez dimensionados los intercambiadores se implementan los diseños en HYSYS, se ajustan los caudales de R236ea, Therminol 55, agua de mar y la presión de la bomba. Los resultados de la simulación del ciclo real se muestran en la Tabla 10.2.1.1.

Fluido	Puntos	Aspen HYSYS	
		T (°C)	P (bar)
R236ea	1	40,00	3,37
	2	41,20	24,10
	3	80,49	23,91
	4	120,00	23,69
	5	62,34	3,45
	6	40,00	3,37
Agua de camisas	7	85,00	3,00
	8	79,19	2,91
Therminol 55	9	175,00	1,50
	10	142,7	1,01
Agua de mar	11	25,00	2,50
	12	29,85	1,22

Figura 10.2.1 - Datos de presión y temperatura del ciclo subcrítico sin aire de barrido simulado con los intercambiadores dimensionados.

En la Tabla 10.3.2 se muestran los valores de caudales y potencias intercambiadas obtenidas en la simulación del ciclo.

Parámetro	Valor	Unidades
Caudal másico de R236ea	15,53	kg/s
Caudal másico de agua de camisas	31,10	
Caudal másico de Therminol 55	27,71	
Caudal másico de agua de mar	124,80	
Potencia calorífica intercambiada en el calentador de agua de camisas	808,28	kW
Potencia calorífica intercambiada en el evaporador de Therminol 55	2 145,07	
Potencia calorífica intercambiada en el condensador.	2 525,84	
Potencia calorífica total suministrada al ciclo	2 953,36	
Trabajo neto del ciclo	297,68	
Rendimiento del ciclo	10,08	%

Tabla 10.3.2 - Caudales y potencias obtenidas de la simulación del ciclo subcrítico sin aire de barrido con los intercambiadores dimensionados.

10.4 Ciclo transcrito de R1234ze(E) sin aire de barrido

La simulación real del ciclo transcrito sin aire de barrido se muestra en la Figura 10.4.1

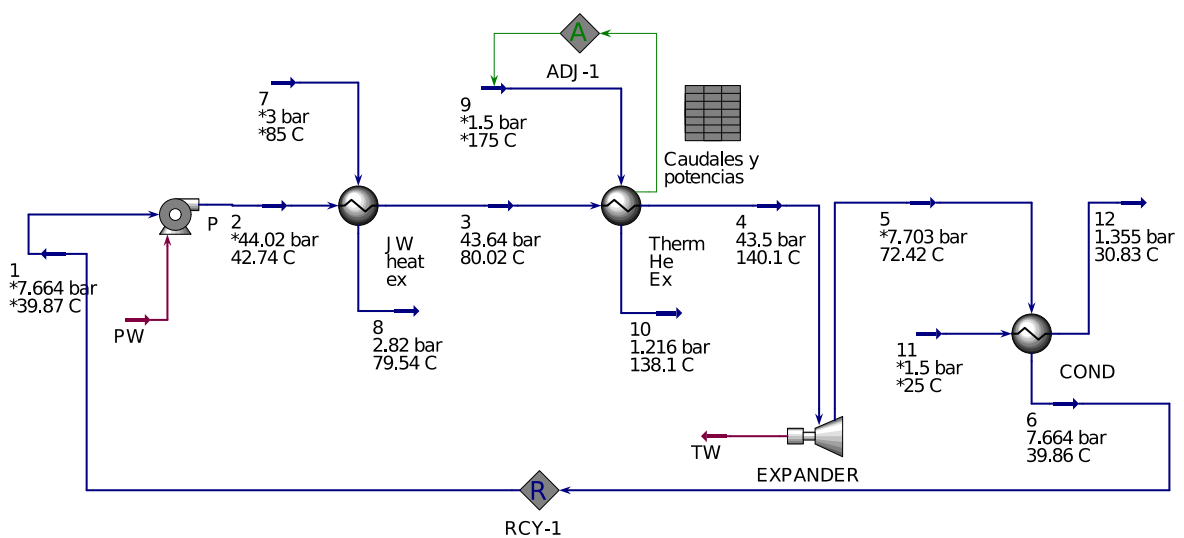


Figura 10.4.1 - Simulación real del ciclo transcrito sin aire de barrido.

Con los intercambiadores implementados en la simulación de HYSYS, los parámetros del ciclo serán los presentados en la Tabla 10.4.1.

Fluido	Puntos	Aspen HYSYS	
		T (°C)	P (bar)
R1234ze(E)	1	39,87	7,66
	2	42,74	43,87
	3	80,02	43,64
	4	140,01	43,50
	5	72,42	7,70
	6	39,87	7,66
Agua de camisas	7	85,00	3,00
	8	79,54	2,82
Therminol 55	9	175,00	1,50
	10	138,10	1,22
Agua de mar	11	25,00	1,50
	12	30,83	1,36

Tabla 10.4.1 - Temperaturas y presiones del fluido a lo largo del ciclo transcrito sin aire de barrido ya dimensionado.

Los valores de los caudales y potencias obtenidos de la simulación del ciclo se reflejan en la Tabla 10.4.2.

Parámetro	Valor	Unidades
Caudal másico de R1234ze(E)	13,68	kg/s
Caudal másico de agua de camisas	31,10	
Caudal másico de Therminol 55	24,42	
Caudal másico de agua de mar	105,96	
Potencia calorífica intercambiada en el calentador de agua de camisas	759,71	kW
Potencia calorífica intercambiada en el evaporador de Therminol 55	2 153,92	
Potencia calorífica intercambiada en el condensador.	2 579,91	
Potencia calorífica total suministrada al ciclo	2 913,63	
Trabajo neto del ciclo	286,11	
Rendimiento del ciclo	9,82	%

Tabla 10.4.2 - Caudales y potencias obtenidas de la simulación el ciclo transcrito sin aire de barrido con los intercambiadores dimensionados.

11 ESTUDIO DE ECONÓMICO

Para conocer el periodo de amortización del proyecto (PAP), tenemos que obtener el coste inicial de proyecto utilizando el programa Capital Cost Estimator (CCE) incluido en la matriz de Aspen, este realiza un análisis económico partiendo del coste de compra de los equipos [14]. A partir del coste de compra de los equipos de la simulación y mediante unas estimaciones de costes se obtiene el coste inicial de proyecto, estas estimaciones se basan en la aplicación de unos índices porcentuales sobre el coste de los equipos comprados (CEC) que forman parte del ciclo, con el fin de calcular el coste total de proyecto (CTP) necesario para su realización [14].

El CTP estará compuesto por los costes fijos más otros gastos como los costes de puesta en marcha, el capital de trabajo, costes de licencias y desarrollo de proyecto [14]. Los costes fijos (CF) se pueden separar en dos familias, los costes fijos directos (CFD) e indirectos (CFI). Entre los costes directos encontramos el precio de compra de los equipos (CEC), la instalación de estos, las canalizaciones de los fluidos, y otros gastos en equipos eléctricos y de instrumentación y control de la planta. Los CFI se componen de gastos de ingeniería y supervisión, los costes de construcción de la planta, y otros costes de índole legal [14]. Los porcentajes aplicables a la estimación del coste total de proyecto se muestran en la Tabla 11.1.1.

Desglose		Porcentaje aplicable. [5], [14]	Porcentaje aplicado. [5], [14]
CFD	CEC	-	-
	Costes de instalación	20-90 %CEC	45 % CEC
	Conducciones	50-70 % CEC	66 %CEC
	Instrumentación y control	6-40 % CEC	20 % CEC
	Materiales y equipos eléctricos.	10-15 % CEC	11 % CEC
CFI	Ingeniería y supervisión	25-75 % CEC	30 % CEC
	Costes de construcción	15 % CFD	15 % CFD
	Contingencias	5-20 % CFD	10 % CFD
	Costes legales	2 % CFD	2 % CFD
Otros	Puesta en marcha	5-12 % CFD	10 % CFD
	Capital de trabajo	10-20 %CTP	-

Tabla 11.1.1 – Porcentajes aplicables al cálculo del coste total de proyecto.

Obtenido el CEC aplicaremos el índice porcentual de cada elemento de el desglose. Una vez obtenido el valor para el CTP a partir de la suma de estos valores, debemos escalarlo mediante el valor CEPCI más actual disponible, ya que nuestro CEC está calculado en función de la base más actual de precios del Capital Cost Estimator, la cual fecha del primer trimestre de 2019, por lo que el cálculo inicial de CTP se realiza para marzo de ese mismo año.

$$CTP_{feb2021} = CTP_{mar2019} \frac{CEPCI_{feb2021}}{CEPCI_{mar2019}} \quad \text{Ecuación 11.1.1}$$

Una vez obtenido en CTP, se necesita conocer el flujo de caja neto anual (FCA_n), que podremos obtener si al ahorro anual de combustible le restamos los gastos de operación y mantenimiento (O&M), estimados en un 2 % del CTP [15].

$$PAP = \frac{CTP_{feb2021}}{FCA_n} \quad \text{Ecuación 11.1.2}$$

Los valores obtenidos para el CTP de los equipos se comprueban y comparan mediante la aplicación de los factores de Lang. Esta es otra manera de calcular el coste estimado total de una planta mediante la aplicación de factores fijos sobre el CEC de la instalación o sobre los CFD [14], [16]. Estos factores tienen un valor diferente dependiendo de si el proyecto se trata de la instalación de una nueva planta, o de si el proyecto se trata de una ampliación, según Turton et al. [16] También se puede establecer un valor fijo que relacione directamente el CTP con el VCE en función de si la planta opera con fluidos, fluidos y sólidos o sólidos únicamente. En nuestro caso como la planta funciona solamente con fluidos el valor del factor de Lang aplicable según este método será $Fl_T = 4,74$ que siendo multiplicado por el VCE nos dará el valor del CTP_L estimado que emplearemos como comparación con el valor obtenido [16]. En la Tabla 11.1.2 se nos muestran los factores de Lang teóricos y el obtenido.

	Bejan et al. [14]		Turton et al. [16]	Este trabajo
CPT	Nueva instalación	Expansión	Planta de procesamiento de fluidos	-
	6,32·CEC	4,16·CEC	4,74·CEC	3,62·CEC

Tabla 11.1.2 - Factores de Lang aplicables.

Teniendo en cuenta los valores de CTP calculados para cada ciclo el factor de Lang obtenido para nuestra instalación es de 3,62 por debajo del factor de referencia de Lang teórico. Esto se debe a que el valor teórico incluye costes supuestos de construcción del lugar donde se ubicaría la instalación, que en nuestro caso no serían necesarios.

Las potencias netas de los equipos WHRS dimensionados se han obtenido a partir de las simulaciones en HYSYS V12.0. El coste de combustible se ha obtenido del Bix World Index (BWI) para el último valor de febrero disponible, en función del precio medio mundial de combustible. La potencia que debe suministrar el motor auxiliar se calcula siguiendo las directrices de la normativa EEDI [12]. Estos datos se recogen en la Tabla 11.1.3.

Parámetro	valor	unidades
Potencia del motor auxiliar [12]	926,5	kW
Carga del motor [12]	50,00	%
Consumo de HFO [12]	198,10	g/kW·h
Consumo de MDO [12]	186,50	g/kW·h
Horas de utilización anual [17]	7200	h
Índice CEPCI para marzo de 2019	616	-
Índice CEPCI para febrero 2021	637,8	-

Tabla 11.1.3 - Datos base de costes y consumo para el estudio económico.

El valor real del combustible es muy variante, y esto repercute directamente en la rentabilidad de proyecto, ya que cuanto mayor sea el precio del combustible mayor será el cash flow neto de nuestro análisis económico, y por lo tanto mayor rentabilidad. Por ello conviene calcular el PAP empleando un rango de coste de combustible; para el estudio tanto con VLSFO como con MDO se emplean los datos comprendidos entre el 8 octubre de 2019 al 6 de julio de 2021, coincidiendo con la primera y última fecha con datos disponibles de valor para el VLSFO. También se emplea el coste medio de combustible para este periodo, para el caso del VLSFO su coste medio es 402,25 €/T y para el MDO el valor medio es de 490,22 €/T.

11.1 Ciclo subcrítico de R236ea con aire de barrido

Los datos de partida para el cálculo son a potencia neta producida por el WHRS obtenida en la simulación del ciclo real de 544,04 kW, y el CEC obtenido para cada ciclo, el cual se desglosa en la Tabla 11.1.1.

Equipo	Precio
Bomba	37 600,00 €
Intercambiador de agua de camisas	75 000,00 €
Intercambiador de aire de barrido	78 000,00 €
Intercambiador de Therminol 55	43 110,00 €
Turbina	439 700,00 €
Condensador	107 700,00 €
CEC	781 110,00 €

Tabla 11.1.1 - Desglose del coste unitario de los equipos del ciclo subcrítico con aire de barrido

A partir de el desglose se genera un gráfico comparativo del precio de los equipos de la planta, en la Figura 11.1.1.

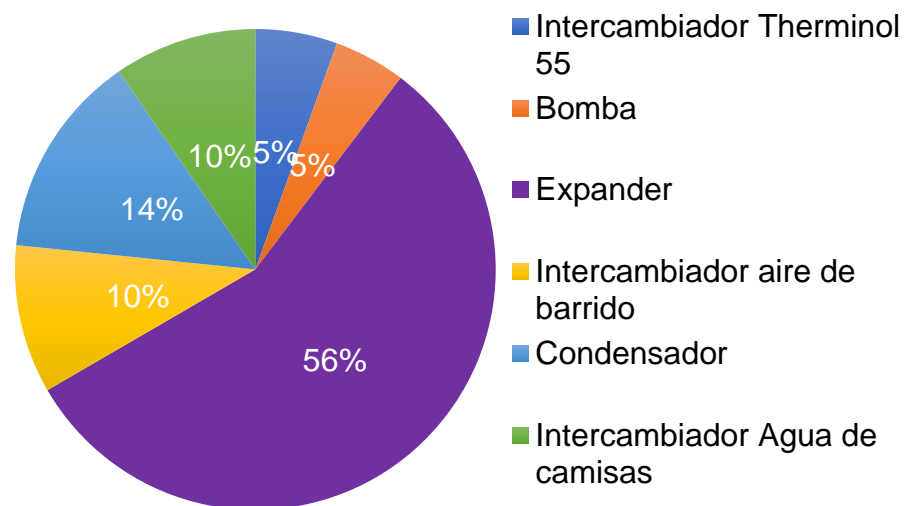


Figura 11.1.1 - Desglose de el CEC del ciclo subcrítico con aire de barrido.

A partir del CEC se calculan los costes fijos totales (CFT) y los gastos variables mostrados en la Tabla 11.1.2

Desglose	Coste estimado
CEC	781 110,00 €
Valor de instalación	351 500,00 €
Conducciones	515 533,00 €
Instrumentación y control	156 222,00 €
Materiales y equipos eléctricos.	85 922,00 €
CFD	1 890 287,00 €
Ingeniería y supervisión	234 333,00 €
Costes de construcción	283 543,00 €
Contingencias	189 029,00 €
Costes legales	37 806,00 €
CFI	744 711,00 €
CFT	2 634 998,00 €
Puesta en marcha	189 029,00 €
CTP _{mar2019}	2 824 025,09 €
CTP _{feb2021}	2 923 966,24 €

Tabla 11.1.2 - Coste estimado del TCI para el ciclo subcrítico con aire de barrido.

De estos datos se obtiene también un coste unitario por kilovatio producido para el ciclo de 5374,54 €/kW.

11.2 Ciclo transcrito de R1234ze(E) con aire de barrido

Este ciclo produce una potencia neta igual a 747,4 kW; el coste unitario de los equipos que conforman el ciclo se muestra en la Tabla 11.2.1

Equipo	Precio
Bomba	124 500,00 €
Intercambiador de agua de camisas	44 200,00 €
Intercambiador de aire de barrido	207 300,00 €
Intercambiador de Therminol 55	37 800,00 €
Turbina	612 000,00 €
Condensador	161 900,00 €
CEC	1 187 700,00 €

Tabla 11.2.1 - Desglose del coste unitario de los equipos del ciclo transcrito con aire de barrido.

En la Figura 11.2.1 se muestra la incidencia de cada uno de los equipos en el CEC para este ciclo.

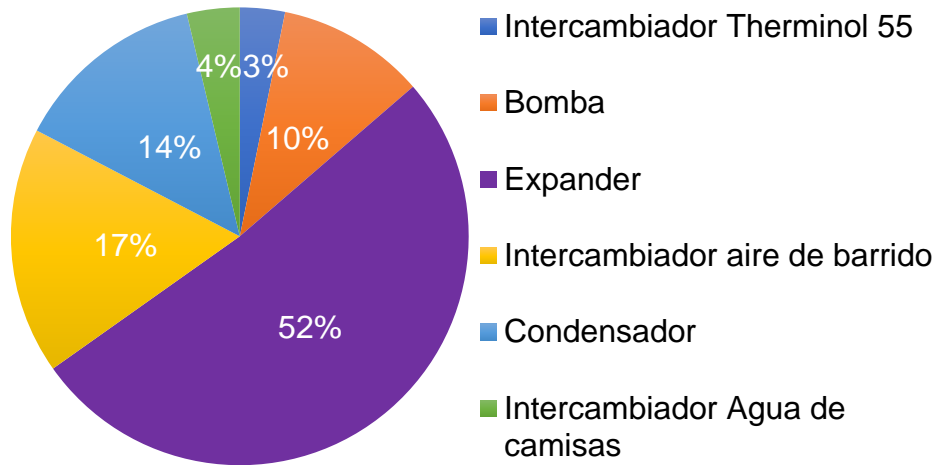


Figura 11.2.1 - Desglose del CEC del ciclo transcrito con aire de barrido.

Una vez conocido el CEC podemos realizar la estimación de costes fijos y variables para ese ciclo, que se muestra en la Tabla 11.2.2.

Desglose	Coste estimado
CEC	1 187 700,00 €
Valor de instalación	534 465,00 €
Conducciones	783 882,00 €
Instrumentación y control	237 540,00 €
Materiales y equipos eléctricos.	130 647,00 €
CFD	2 874 234,00 €
Ingeniería y supervisión	356 310,00 €
Costes de construcción	431 135,00 €
Contingencias	287 423,00 €
Costes legales	57 485,00 €
CFI	1 132 353,00 €
CFT	4 006 587,00 €
Puesta en marcha	287 423,00 €
CTP _{mar2019}	4 294 010,58 €
CTP _{feb2021}	4 445 973,94 €

Tabla 11.2.2 - Coste estimado del CTP para el ciclo transcrito con aire de barrido.

Mediante el análisis de los datos y la resolución de las ecuaciones anteriormente mencionadas en EES obtendremos un coste unitario final por kilovatio producido de 5948,59 €/kW.

11.3 Ciclo subcrítico de R236ea sin aire de barrido

El ciclo subcrítico sin aire de barrido produce una potencia neta de 297,68 kW. A continuación, se muestra en la Tabla 11.3.1 el desglose del coste unitario de las unidades que conforman el ciclo.

Equipo	Precio
Bomba	28 500,00 €
Intercambiador de agua de camisas	35 500,00 €
Intercambiador de Therminol 55	34 300,00 €
Turbina	288 200,00 €
Condensador	94 600,00 €
CEC	481 100,00 €

Tabla 11.3.1 - Desglose del coste unitario de los equipos del ciclo subcrítico sin aire de barrido.

En la Figura 11.3.1 se muestra un gráfico comparativo del impacto de cada equipo en el CEC, para este ciclo.

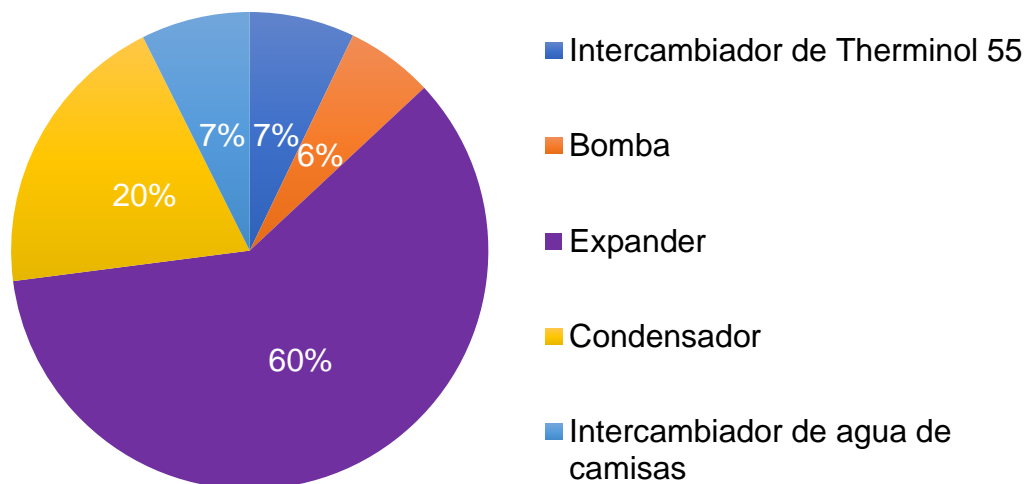


Figura 11.3.1 - Desglose del CEC del ciclo subcrítico sin aire de barrido.

El cálculo por estimación de porcentajes para el cálculo del CTP de este ciclo se muestra en la Tabla 11.3.2.

Desglose	Coste estimado
Valor de compra CEC	481 100,00 €
Valor de instalación	216 495,00 €
Conducciones	317 526,00 €
Instrumentación y control	96 220,00 €
Materiales y equipos eléctricos.	52 921,00 €
CFD	1 164 262,00 €
Ingeniería y supervisión	144 330,00 €
Costes de construcción	174 639,00 €
Contingencias	116 426,00 €
Costes legales	23 285,00 €
CFI	458 681,00 €
CFT	1 622 943,00 €
Puesta en marcha	116 426,00 €
CTP _{mar2019}	1 739 368,94 €
CTP _{feb2021}	1 800 924,53 €

Tabla 11.3.2 - Coste estimado del CTP para el ciclo subcrítico sin aire de barrido.

Se observa que el valor del coste unitario por kilovatio producido para este ciclo es de 6049,86 €/kW, más elevado que el ciclo subcrítico con intercambiador de aire de barrido, esto se debe a que a que a pesar de ser uno de los intercambiadores más caros, se trata del que más potencia calorífica aporta al ciclo.

11.4 Ciclo transcrito de R1234ze(E) sin aire de barrido

Para este ciclo el trabajo neto desarrollado es de 284,84 kW, el CEC resulta de la suma de costes de los equipos, cuyo precio se muestra en la Tabla 11.4.4.

Equipo	Precio
Bomba	86 900,00 €
Intercambiador de agua de camisas	27 300,00 €
Intercambiador de Therminol 55	37 000,00 €
Turbina	298 500,00 €
Condensador	106 800,00 €
CEC	556 500,00 €

Tabla 11.4.4 - Desglose del CEC de los equipos del ciclo transcrito sin aire de barrido

En la Figura 11.4.1 se puede observar el peso de cada equipo en el CEC de toda la instalación.

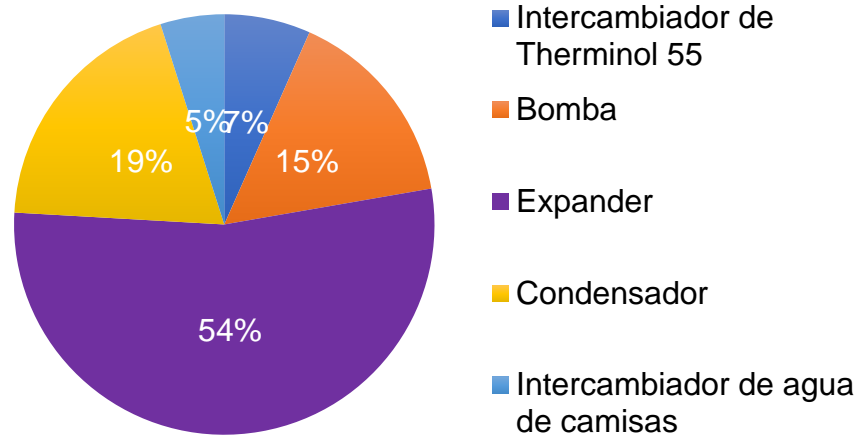


Figura 11.4.1 - Desglose de el CEC del ciclo transcrito sin aire de barrido.

Aplicando la estimación de costes por porcentajes se obtiene el valor del CTP desglosado en la Tabla 11.4..

Desglose	Coste estimado
VCE	556 500,00 €
Valor de instalación	250 425,00 €
Conducciones	367 290,00 €
Instrumentación y control	111 300,00 €
Materiales y equipos eléctricos.	61 215,00 €
CFD	1 346 730,00 €
Ingeniería y supervisión	166 950,00 €
Costes de construcción	202 010,00 €
Contingencias	134 673,00 €
Costes legales	26 935,00 €
CFI	530 567,00 €
CFT	1 877 279,00 €
Puesta en marcha	134 673,00 €
CTP _{mar2019}	2 011 970,10 €
CTP _{feb2021}	2 083 172,94 €

Tabla 11.4.2 - Coste estimado del CTP para el ciclo transcrito sin aire de barrido.

De estos resultados se obtiene un coste unitario por kilovatio producido para este ciclo de 7313,48 €/kW. En este caso la diferencia de coste unitario del ciclo sin intercambiador de aire de barrido respecto al que si lo tiene es mayor que en los ciclos subcríticos, esto sucede porque la potencia aportada por el aire de barrido en el ciclo transcrito es mayor.

12 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Los resultados obtenidos para el PAP medio calculado a partir del precio medio de combustible se presentan junto con el precio unitario de cada uno de los ciclos en la Tabla 12.1.1.

Ciclo		Coste unitario (€/kW)	PAP _{m,MDO} (años)	PAP _{m,VLSFO} (años)
Con aire de barrido	R236ea	5374,54	9,76	11,53
	R1234ze(E)	5948,59	11,03	13,08
Sin aire de barrido	R236ea	6049,86	11,26	13,36
	R1234ze(E)	7313,48	14,28	17,11

Tabla 12.1.1 - Resultados de periodo de amortización de proyecto medio para cada ciclo.

En la Figura 12.1.1 se muestra una comparativa sobre el periodo de amortización en función del rango de precio de VLSFO. Se deduce de la tabla que el periodo de amortización está relacionado directamente con el coste unitario de la instalación.

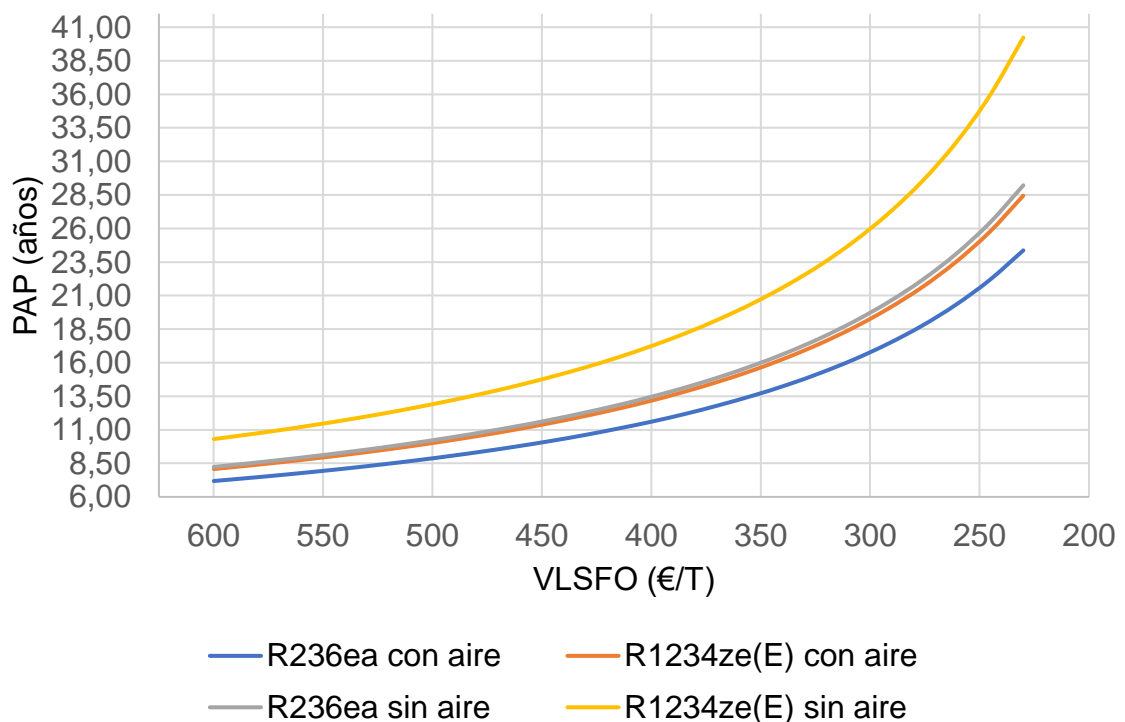


Figura 12.1.1 - Comparativa PAP de los ciclos con VLSFO como combustible.

En la se muestra con mayor claridad que los ciclos que ofrecen más rentabilidad para el consumo de fuel son los que aprovechan el calor aportado por el aire de

barrido, aunque la curva de PAP del ciclo subcrítico sin aire de barrido se aproxima mucho a la del ciclo transcrito que si aprovecha el calor de este. El mismo procedimiento se realiza con el consumo de MDO y se elabora la gráfica de la Figura 12.1.2.

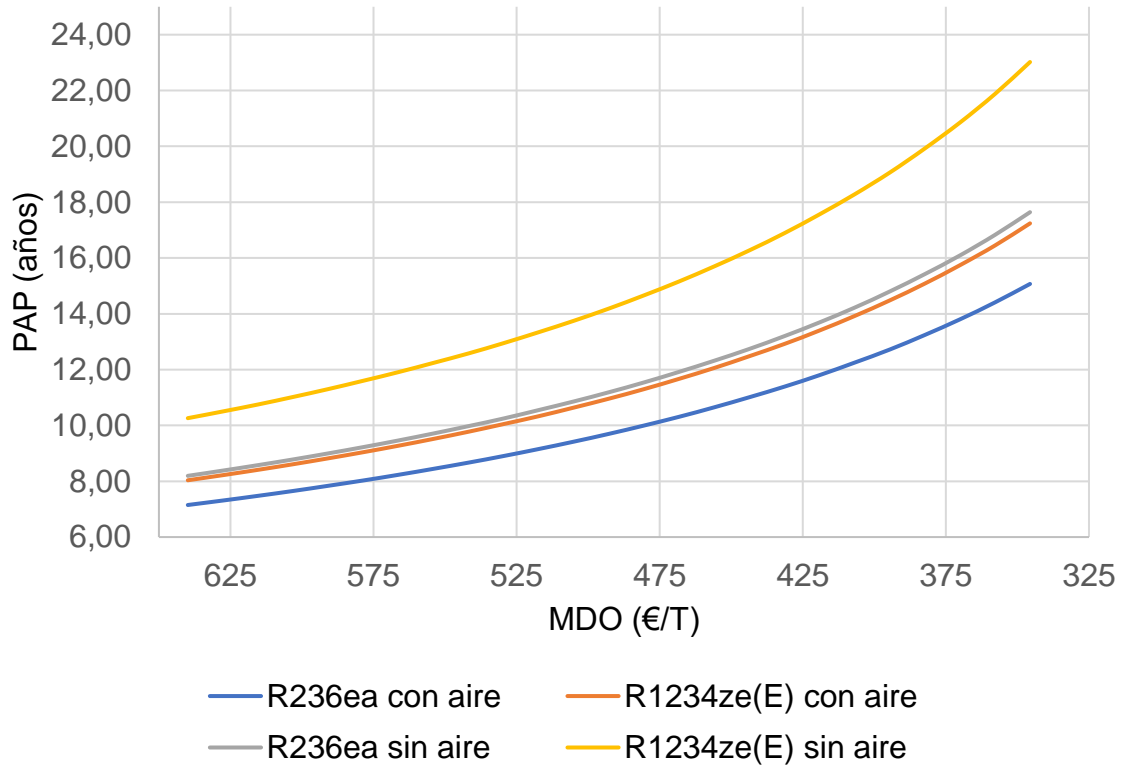


Figura 12.1.2 - Comparativa PAP de los ciclos con MDO como combustible.

Se puede percibir en ambos gráficos y en la tabla con los periodos de amortización medios, que los ciclos con aire de barrido son los que menos tiempo de amortización requieren independientemente del combustible que consuman los motores auxiliares, por lo que mediante una comparativa entre estos con ambos combustibles se puede observar el rango de tiempo que requiere dicha amortización, esta comparación se muestra en la Figura 12.1.3.

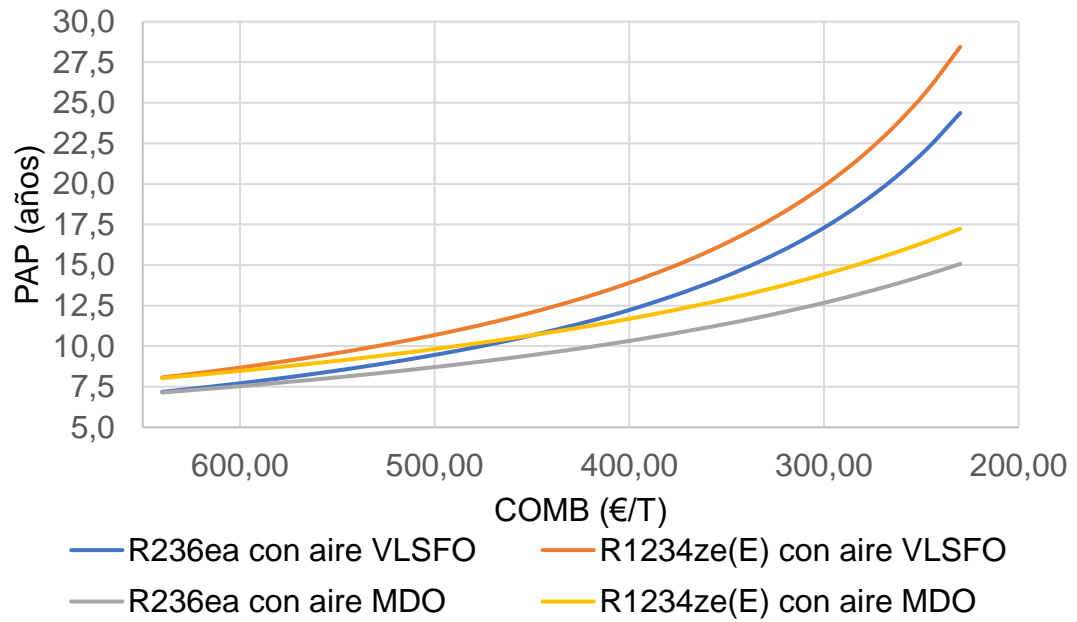


Figura 12.1.3 - Comparativa ciclo subcrítico vs supercrítico.

A partir de esta gráfica y de las anteriores, obtenemos claramente que para un mismo precio de combustible, el ciclo subcrítico ofrece mayor rentabilidad que el transcrito independientemente del combustible que se esté consumiendo.

El combustible ahorrado anualmente por cada uno de los ciclos se muestra en la Tabla 12.1.2 en valor absoluto y porcentual. El consumo anual de los motores auxiliares se calcula para ambos combustibles; los consumos anuales estimados sin WHRS son para el diésel de 1 244,10 t/año y para el fuel de 1 321,49 t/año.

Ciclos		Ahorro por el WHRS de VLSFO (t/año)	Ahorro por el WHRS de MDO (t/año)	Ahorro producido (%)
Con aire de barrido	R236ea	775,95	730,54	58,72
	R1234ze(E)	1 066,33	1 003,61	80,67
Sin aire de barrido	R236ea	424,59	399,72	32,13
	R1234ze(E)	406,27	382,48	30,74

Tabla 12.1.2 - Ahorro de combustible anual derivado la instalación de un WHRS.

Los datos obtenidos muestran que el mayor ahorro de combustible es producido por los ciclos que recuperan el calor del aire de barrido, especialmente por el ciclo transcrito, ya que la potencia neta generada por este es muy superior a los demás.

13 CONCLUSIÓN

En el presente trabajo se ha realizado el análisis económico de dos tipos de ORC, uno subcrítico con R236ea y otro transcrito con R1234ze(E), que aprovechan el calor residual del agua de camisas, aire de barrido y gases de escape de un motor de dos tiempos. Además, se han estudiado las versiones correspondientes de los ciclos anteriores sin el aprovechamiento del calor residual del aire de barrido.

Los ciclos con menor relación €/kW son aquellos que aprovechan la energía residual del aire de barrido. Los resultados obtenidos sugieren que el precio unitario del ciclo subcrítico es de 5374,54 €/kW, mientras que para el ciclo transcrito el valor asciende hasta 5948,59 €/kW.

Respecto al periodo de amortización, los ciclos que aprovechan el calor residual del aire de barrido se amortizan antes que aquellos que carecen del intercambiador de aire de barrido. Sin embargo, ninguno de estos muestra una rentabilidad a corto plazo. Concretamente, el ciclo subcrítico con aire de barrido obtiene un periodo de amortización para el precio medio de combustible de 9,76 (MDO) y 11,53 (VLSFO) años. En el caso del ciclo transcrito, el periodo de amortización aumenta hasta 11,03 (MDO) y 13,08 (VLSFO) años.

En lo referente al ahorro de combustible en los motores auxiliares, el consumo anual se reduce un 80,67 % para el ciclo transcrito y un 58,72 % en el ciclo subcrítico, ambos con el aprovechamiento del aire de barrido. Si no se explota esta fuente de calor residual, el ahorro de combustible anual desciende a valores cercanos al 30 %. Por lo que, desde un enfoque para reducir el EEDI es de interés la instalación del ciclo transcrito con aprovechamiento de aire de barrido.

14 REFERENCIAS

- [1] M. E. Mondejar, J. G. Andreasen, L. Pierobon, U. Larsen, M. Thern, y F. Haglind, «A review of the use of organic Rankine cycle power systems for maritime applications», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 91. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.03.074.
- [2] Ok. Smith TWP, Jalkanen JP, Anderson BA, Corbett JJ, Faber J, Hanayama S, L. E, Parker S, Johansson L, Aldous L, Raucci C, Traut M, Ettinger S, Nelissen D, y P. A. DS, Ng S, Agrawal A, Winebrake JJ, Hoen M, Chesworth S, «Third IMO Greenhouse Gas Study 2014», London, United Kingdom, 2014. [En línea]. Disponible en: [https://www.research.manchester.ac.uk/portal/en/publications/third-imo-greenhouse-gas-study-2014\(e43828fb-354c-4459-bfc5-77ac7fa4a181\).html](https://www.research.manchester.ac.uk/portal/en/publications/third-imo-greenhouse-gas-study-2014(e43828fb-354c-4459-bfc5-77ac7fa4a181).html).
- [3] E. Macchi y M. Astolfi, *Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems: Technologies and Applications*. 2016.
- [4] J. Sarkar y S. Bhattacharyya, «Potential of organic Rankine cycle technology in India: Working fluid selection and feasibility study», *Energy*, vol. 90, pp. 1618-1625, 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.07.001.
- [5] S. Lemmens, «Cost engineering techniques & their applicability for cost estimation of organic rankine cycle systems», *Energies*, vol. 9, n.º 7, 2016, doi: 10.3390/en9070485.
- [6] L. Pierobon, T. Van Nguyen, U. Larsen, F. Haglind, y B. Elmegaard, «Multi-objective optimization of organic Rankine cycles for waste heat recovery: Application in an offshore platform», *Energy*, vol. 58, pp. 538-549, 2013, doi: 10.1016/j.energy.2013.05.039.
- [7] M. H. Yang, «Thermal and economic analyses of a compact waste heat recovering system for the marine diesel engine using transcritical Rankine cycle», *Energy Convers. Manag.*, vol. 106, pp. 1082-1096, 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2015.10.050.
- [8] U. Larsen, L. Pierobon, F. Baldi, F. Haglind, y A. Ivarsson, «Development of a model for the prediction of the fuel consumption and nitrogen oxides emission trade-off for large ships», *Energy*, vol. 80, pp. 545-555, 2015, doi:

- 10.1016/j.energy.2014.12.009.
- [9] «First reference installation of Opcon Waste Heat Recovery technology for ships; potential for 5–10% fuel savings», 2012. <https://www.greencarcongress.com/2012/08/opcon-20120826.html> (accedido jul. 01, 2021).
- [10] C. Sellers, «Field operation of a 125kW ORC with ship engine jacket water», *Energy Procedia*, vol. 129, pp. 495-502, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.168.
- [11] «Climeon receives second waste heat-to-power order from Viking Line», *Bioenergy International*, 2017. <https://bioenergyinternational.com/heat-power/climeon-receives-second-waste-heat-power-order-viking-line>.
- [12] M. Naveiro y M. Romero, «Sistemas de recuperación de calor residual en buques.», 2018.
- [13] S. Kakaç, H. Liu, y A. Pramuanjaroenkij, *Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design, Third Edition*, vol. 6. 2012.
- [14] A. Bejan, G. Tsatsaronis, y M. Moran, «Thermal Design and Optimization- John Wiley & Sons». pp. 1-542, 1996.
- [15] E. L. Tsougranis y D. Wu, «A feasibility study of Organic Rankine Cycle (ORC) power generation using thermal and cryogenic waste energy on board an LNG passenger vessel», *Int. J. Energy Res.*, vol. 42, n.º 9, pp. 3121-3142, 2018, doi: 10.1002/er.4047.
- [16] R. Turton, J. A. Shaeiwitz, D. Bhattacharyya, y W. B. Whiting, *Analysis Synthesis and Design of Chemical Processes*, 5ª. Pearson Education, Inc., 2018.
- [17] Z. Tian, Y. Yue, B. Gu, W. Gao, y Y. Zhang, «Thermo-economic analysis and optimization of a combined Organic Rankine Cycle (ORC) system with LNG cold energy and waste heat recovery of dual-fuel marine engine», *Int. J. Energy Res.*, vol. 44, n.º 13, pp. 9974-9994, 2020, doi: 10.1002/er.5529.

15 DEFINICIONES ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

BWI: Bix World Index.

CCE: Capital Cost Estimator.

CEPCI: Chemical Engineering Plant Cost Index.

CFD: costes fijos directos.

CFI: costes fijos indirectos.

CFT: costes fijos totales.

Cons_{an,MDO}: consumo anual de MDO.

Cons_{an,VLSFO}: consumo anual de VLSFO.

Cost_{med}: coste medio del combustible.

Cost_{u,sca}: coste unitario del ciclo subcrítico con aire de barrido.

Cost_{u,ssa}: coste unitario del ciclo subcrítico sin aire de barrido.

Cost_{u,tca}: coste unitario del ciclo transcrito con aire de barrido.

Cost_{u,tca}: coste unitario del ciclo transcrito sin aire de barrido.

CTP: coste total de proyecto.

CTP_L: coste total de proyecto de Lang.

EDR: Exchanger Desing and Rating.

EEDI: Energy Efficiency Design Index.

EES: Engineering Equation Solver, software de cálculo.

FCA_n: flujo de caja anual neto.

FL_c: factor de Lang calculado.

FL_T: factor de Lang teórico.

GNL: Gas Natural Licuado.

LCTC: Large Car and Truck Carrier.

LR: Lloyd's Registry

MDO: medium diesel oil.

NK: Nippon Kaiji Kyokai.

O&M: operación y mantenimiento.

ORC: Organic Rankine Cycle.

P: presión (bar).

PAP: periodo de amortización de proyecto.

$PAP_{m,MDO}$: periodo de amortización medio de proyecto consumiendo MDO.

$PAP_{m,VLSFO}$: periodo de amortización medio consumiendo VLSFO.

TEMA: Tubular Exchangers Manufacturers Association.

T: temperatura °C.

TEU: Twenty-foot Equivalent Unit, contenedor de 20 pies, unidad de medida para la carga de los portacontenedores.

VCE: valor de compra de los equipos.

VLSFO: very low sulfur fuel oil.

WHRS: sistemas de recuperación de calor residual (waste heat recovery system).

$W_{n,sca}$: trabajo neto del ciclo subcrítico con aire de barrido (kW).

$W_{n,ssa}$: trabajo neto del ciclo subcrítico sin aire de barrido (kW).

$W_{n,tca}$: trabajo neto del ciclo transcrito con aire de barrido (kW).

$W_{n,tca}$: trabajo neto del ciclo transcrito sin aire de barrido (kW).

16 ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.1 - Datos del buque portacontenedores CAP ARNAUTI de 6600 TEU	7
Tabla 5.2 - Fuentes de calor disponibles.	8
Tabla 7.5.1 - Presión y temperatura de los fluidos obtenidos en la verificación de modelo subcrítico.	17
Tabla 7.5.2 - Caudales y potencias obtenidos para la verificación del modelo subcrítico.	18
Tabla 7.5.3 - Presiones y temperaturas para la verificación de modelo del ciclo transcrito.	19
Tabla 7.5.4 - Caudales y potencias obtenidos para la verificación del modelo subcrítico.	20
Tabla 8.1.1 - Datos de presión y temperatura teóricos para los puntos del ciclo subcrítico sin aire de barrido.	23
Tabla 8.1.2 - Caudales de los fluidos y potencias intercambiadas en el ciclo subcrítico sin aire de barrido.	24
Tabla 8.2.1 - Datos de presión y temperatura para los puntos del ciclo transcrito sin aire de barrido.	26
Tabla 8.2.2 - Caudales de los fluidos y potencias intercambiadas en el ciclo transcrito sin aire de barrido.	27
Tabla 9.1 - Factores de fouling típicos aplicados a los intercambiadores de carcasa y tubos.	31
Tabla 9.2.1.1 - Datos de las corrientes de la simulación de máximas pérdidas admisibles del ciclo subcrítico con R236ea con aire de barrido.	33
Tabla 9.2.1.2 - Caudales y potencias obtenidos en la simulación con las máximas pérdidas admisibles para el ciclo subcrítico con aire de barrido.	34
Tabla 9.2.2.1 - Parámetros de funcionamiento del intercambiador de agua de camisas del circuito subcrítico.	35
Tabla 9.2.2.2 - Parámetros de funcionamiento del intercambiador de aire de barrido del ciclo subcrítico.	36

Tabla 9.2.2.3 - Parámetros de funcionamiento del evaporador de Therminol 55 en el ciclo subcrítico con aire de barrido.	37
Tabla 9.2.2.4 - Parámetros de funcionamiento del condensador del circuito subcrítico con aire de barrido.	38
Tabla 9.3.1.1 - Datos de las corrientes de la simulación de máximas pérdidas admisibles del ciclo transcrito con aire de barrido.	40
Tabla 9.3.2.1 - Caudales y potencias obtenidos de la simulación del ciclo transcrito con aire de barrido.	41
Tabla 9.3.2.2 - Parámetros de funcionamiento del intercambiador de agua de camisas del ciclo transcrito con aire de barrido.	42
Tabla 9.3.2.3 - Parámetros de funcionamiento del intercambiador de aire de barrido del ciclo transcrito con aire de barrido.	43
Tabla 9.3.2.4 - Parámetros de funcionamiento del intercambiador de Therminol 55 del ciclo transcrito con aire de barrido.	44
Tabla 9.3.2.5 - Parámetros de funcionamiento del condensador del ciclo transcrito con aire de barrido.	45
Tabla 9.4.1.1 - Datos de las corrientes de la simulación de máximas pérdidas admisibles del ciclo subcrítico sin aire de barrido.	47
Tabla 9.4.1.2 - Caudales y potencias obtenido en la simulación con las máximas pérdidas admisibles para el ciclo subcrítico sin aire de barrido.	48
Tabla 9.4.2.3 - Parámetros de funcionamiento para el intercambiador de agua de camisas del ciclo subcrítico sin aire de barrido.	49
Tabla 9.4.2.2 - Datos de funcionamiento del intercambiador de Therminol 55 del ciclo subcrítico sin aire de barrido.	50
Tabla 9.4.2.3 - Parámetros de funcionamiento del condensador del ciclo subcrítico sin aire de barrido.	51
Tabla 9.5.1.4 - Datos de las corrientes de la simulación de máximas pérdidas admisibles del ciclo transcrito sin aire de barrido.	53
Tabla 9.5.1.5 - Caudales y potencias obtenidos de la simulación del ciclo transcrito sin aire de barrido.	54

Tabla 9.5.6 - Parámetros de funcionamiento para el intercambiador de agua de camisas del ciclo transcrito sin aire de barrido.	55
Tabla 9.5.7 - Parámetros de funcionamiento para el evaporador de Therminol 55 del ciclo transcrito sin aire de barrido.	56
Tabla 9.5.8 - Parámetros de funcionamiento para el condensador del ciclo transcrito sin aire de barrido.	57
Tabla 10.1.1 - Resultados de la simulación del ciclo subcrítico con aire de barrido con los intercambiadores dimensionados.	59
Tabla 10.1.2 - Caudales y potencias del ciclo subcrítico con aire de barrido con los intercambiadores dimensionados.	60
Tabla 10.2.1 - Datos de presión y temperatura del ciclo transcrito simulado con los intercambiadores dimensionados.	61
Tabla 10.2.2 - Caudales y potencias obtenidas de la simulación del ciclo transcrito con los intercambiadores dimensionados.	62
Tabla 10.3.2 - Caudales y potencias obtenidas de la simulación del ciclo subcrítico sin aire de barrido con los intercambiadores dimensionados.	64
Tabla 10.4.1 - Temperaturas y presiones del fluido a lo largo del ciclo transcrito sin aire de barrido ya dimensionado.	65
Tabla 10.4.2 - Caudales y potencias obtenidas de la simulación el ciclo transcrito sin aire de barrido con los intercambiadores dimensionados.	66
Tabla 11.1.1 – Porcentajes aplicables al cálculo del coste total de proyecto.	68
Tabla 11.1.2 - Factores de Lang aplicables.	69
Tabla 11.1.3 - Datos base de costes y consumo para el estudio económico.	70
Tabla 11.1.2 - Coste estimado del TCI para el ciclo subcrítico con aire de barrido.	72
Tabla 11.2.1 - Desglose del coste unitario de los equipos del ciclo transcrito con aire de barrido.	72
Tabla 11.2.2 - Coste estimado del CTP para el ciclo transcrito con aire de barrido.	73

Tabla 11.3.1 - Desglose del coste unitario de los equipos del ciclo subcrítico sin aire de barrido.....	74
Tabla 11.3.2 - Coste estimado del CTP para el ciclo subcrítico sin aire de barrido.	75
Tabla 11.4.4 - Desglose del CEC de los equipos del ciclo transcrito sin aire de barrido.....	75
Tabla 11.4.2 - Coste estimado del CTP para el ciclo transcrito sin aire de barrido.	76
Tabla 12.1.1 - Resultados de periodo de amortización de proyecto medio para cada ciclo.....	78
Tabla 12.1.2 - Ahorro de combustible anual derivado la instalación de un WHRS.	80

17 ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 - Metodología llevada a cabo en el trabajo fin de grado.....	4
Figura 6.1 - Esquema del circuito de WHRS.....	9
Figura 6.2 - Diagrama T-s del circuito con R236ea.....	10
Figura 6.3 – Diagrama T-s del ciclo transcrito.....	11
Figura 7.3.1 - Verificación de modelo en Aspen Plus: ciclo transcrito con R236ea.	14
Figura 7.3.2 – Verificación de modelo en HYSYS: ciclo subcrítico con R236ea. ...	14
Figura 7.4.2 - Entorno de simulación de Aspen Plus. Ciclo transcrito con R1234ze(E), verificación de modelo.	16
Figura 7.3.1 - Entorno de simulación de HYSYS. Ciclo transcrito con R1234ze(E), verificación de modelo.	16
Figura 8.1 - Esquema de los ciclos sin intercambiador de aire de barrido.	21
Figura 8.2 – Simulación en HYSYS del ciclo subcrítico de R236ea sin aire de barrido.....	22
Figura 8.3 – Simulación del ciclo subcrítico de R236ea sin aire de barrido.	23
Figura 8.4 - Simulación de Aspen Plus del ciclo transcrito con R1234ze(E).	25
Figura 9.1 - Tipos estándar de cabezales delanteros y traseros y carcasas establecidos por TEMA.	29
Figura 9.2.1.1 - Simulación del ciclo de R236ea con aire de barrido, pérdidas máximas admisibles.....	32
Figura 9.3.1.1 - Simulación con máximas pérdidas admisibles ciclo R1234ze(E) sin aire de barrido.	39
Figura 9.3.1.1 - Simulación con las máximas pérdidas admisibles para el ciclo subcrítico sin aire de barrido.	46
Figura 9.4.1.1 - Simulación con las máximas pérdidas admisibles para el ciclo transcrito sin aire de barrido.....	52
Figura 10.3.1 - Simulación real del ciclo subcrítico sin aire de barrido.....	62

Figura 10.2.1 - Datos de presión y temperatura del ciclo subcrítico sin aire de barrido simulado con los intercambiadores dimensionados.	63
Figura 10.4.1 - Simulación real del ciclo transcrito sin aire de barrido.	64
Figura 11.1.1 - Desglose de el CEC del ciclo subcrítico con aire de barrido.....	71
Figura 11.2.1 - Desglose del CEC del ciclo transcrito con aire de barrido.	73
Figura 11.3.1 - Desglose del CEC del ciclo transcrito sin aire de barrido.....	74
Figura 11.4.1 - Desglose de el CEC del ciclo transcrito sin aire de barrido.....	76
Figura 12.1.1 - Comparativa PAP de los ciclos con VLSFO como combustible....	78
Figura 12.1.2 - Comparativa PAP de los ciclos con MDO como combustible.	79
Figura 12.1.3 - Comparativa ciclo subcrítico vs supercrítico.	80



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



ESCOLA TÉCNICA SUPERIOR DE
NÁUTICA E MÁQUINAS

“ESTUDIO ECONÓMICO DEL CICLO ORGÁNICO DE RANKINE EN UN PORTACONTENEDORES DE 6600 TEU”

ANEXO



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA Y MÁQUINAS

FECHA: JULIO 2021

AUTOR: JUAN HERBELLO MILLÁN

Fdo.: JUAN HERBELLO MILLÁN

ÍNDICE DEL ANEXO

1	HOJAS DE ESPECIFICACIÓN DE LOS INTERCAMBIADORES.....	95
1.1	Ciclo subcrítico con aire de barrido.....	95
1.1.1	Intercambiador de agua de camisas.....	96
1.1.2	Intercambiadores de aire de barrido.....	97
1.1.3	Intercambiador de Therminol 55.....	98
1.1.4	Condensador.....	100
1.2	Ciclo transcrito con aire de barrido.....	101
1.2.1	Intercambiador de agua de camisas.....	101
1.2.2	Intercambiadores de aire de barrido.....	102
1.2.3	Intercambiador de Therminol 55.....	103
1.2.4	Condensador.....	104
1.3	Ciclo subcrítico sin aire de barrido.....	105
1.3.1	Intercambiador de agua de camisas.....	105
1.3.2	Intercambiador de therminol 55.....	106
1.3.3	Condensador.....	107
1.4	Ciclo transcrito sin aire de barrido.....	108
1.4.1	Intercambiador de agua de camisas.....	108
1.4.2	Intercambiador de Therminol 55.....	109
1.4.3	Condensador.....	110
2	CÁLCULOS PARA EL ESTUDIO ECONÓMICO EN EES.....	111
2.1	Ciclo subcrítico con aire de barrido.....	111
2.2	Ciclo transcrito con aire de barrido.....	114
2.3	Ciclo subcrítico sin aire e barrido.....	117
2.4	Ciclo transcrito sin aire de barrido.....	121
3	REPORTS DE LAS SIMULACIONES DE LOS CICLOS REALES.....	124
3.1	Ciclo subcrítico de R236ea con aire de barrido.....	124

3.2	Ciclo transcrito de R1234ze(E) con aire de barrido.....	126
3.3	Ciclo subcrítico de R236ea sin aire de barrido.....	128
3.4	Ciclo transcrito de R1234ze(E) sin aire de barrido.....	130

1 HOJAS DE ESPECIFICACIÓN DE LOS INTERCAMBIADORES

1.1 Ciclo subcrítico con aire de barrido

Aspen Exchanger Design and Rating Shell & Tube V12

File: C:\Users\Usuario\Desktop\int sub con aire\Agua de camisas.EDR

Printed: 02/07/2021 at 5:01:06

TEMA Sheet

Heat Exchanger Specification Sheet

1	Company:					
2	Location:					
3	Service of Unit:	Our Reference:				
4	Item No.:	Your Reference:				
5	Date:	Rev No.:	Job No.:			
6	Size:	737 - 8000	mm	Type:	AEN Horizontal	Connected in: 1 parallel 1 series
7	Surf/unit(eff.)	356,2	m ²	Shells/unit	1	Surf/shell(eff.) 356,2 m ²
8	PERFORMANCE OF ONE UNIT					
9	Fluid allocation	Shell Side		Tube Side		
10	Fluid name	8		2		
11	Fluid quantity, Total	33,1		25,0066		
12	Vapor (In/Out)	kg/s	0	0	0	0
13	Liquid	kg/s	33,1	33,1	25,0066	25,0066
14	Noncondensable	kg/s	0	0	0	0
15						
16	Temperature (In/Out)	°C	85	75,75	41,26	80,11
17	Bubble / Dew point	°C	/	/	/	/
18	Density Vapor/Liquid	kg/m ³	/ 968,7	/ 974,48	/ 1383,59	/ 1239,03
19	Viscosity	mPa-s	/ 0,3331	/ 0,3738	/ 0,3219	/ 0,1964
20	Molecular wt, Vap					
21	Molecular wt, NC					
22	Specific heat	kJ/(kg-K)	/ 4,2	/ 4,193	/ 1,253	/ 1,36
23	Thermal conductivity	W/(m-K)	/ 0,6702	/ 0,6642	/ 0,075	/ 0,0623
24	Latent heat	kJ/kg				
25	Pressure (abs)	bar	3	2,91236	25,19293	25,15067
26	Velocity (Mean/Max)	m/s	0,32 / 0,36		0,15 / 0,15	
27	Pressure drop, allow./calc.	bar	0,5	0,08764	0,5	0,04226
28	Fouling resistance (min)	m ² -K/W	0,00018		0,00018	0,00023 Ao based
29	Heat exchanged	1285,3	kW		MTD (corrected)	14,92 °C
30	Transfer rate, Service	241,9	Dirty	242	Clean	268,1 W/(m ² -K)
31	CONSTRUCTION OF ONE SHELL					Sketch
32		Shell Side		Tube Side		
33	Design/Vacuum/test pressure	bar	3,44738 /	/	28,26852/	/
34	Design temperature / MDMT	°C	121,11 /	/	115,56 /	/
35	Number passes per shell		1		1	
36	Corrosion allowance	mm	1,59		1,59	
37	Connections	In	mm	1 202,72 /	-	1 102,26 /
38	Size/Rating	Out	mm	1 154,05 /	-	1 154,05 /
39	ID	Intermediate		/ -	/ -	/ -
40	Tube #	755	OD: 19,05	Tks. Average 2,11	mm	Length: 8000 mm Pitch: 23,81 mm Tube pattern:30
41	Tube type:	Plain	Insert:None	Fin#:	#/m	Material:Carbon Steel
42	Shell	Carbon Steel	ID 736,6	OD 752,48	mm	Shell cover -
43	Channel or bonnet	Carbon Steel				Channel cover Carbon Steel
44	Tubesheet-stationary	Carbon Steel	-			Tubesheet-floating -
45	Floating head cover	-				Impingement protection None
46	Baffle-cross	Carbon Steel	Type	Single segmental	Cut(%d) 38,8	Hori:Spacing: c/c 603,25 mm
47	Baffle-long	-	Seal Type			Inlet 623,39 mm
48	Supports-tube	U-bend	0	Type		
49	Bypass seal	-	Tube-tubesheet joint			Expanded only (2 grooves)(App.A 'i')
50	Expansion joint	-	Type	None		
51	RhoV2-Inlet nozzle	1086	Bundle entrance	182	Bundle exit	494 kg/(m-s ²)
52	Gaskets - Shell side	-	Tube side			Flat Metal Jacket Fibe
53	Floating head	-				
54	Code requirements	ASME Code Sec VIII Div 1		TEMA class	C - general service	
55	Weight/Shell	8826,7	Filled with water	11824,1	Bundle	5788 kg
56	Remarks					
57						
58						

1.1.1 Intercambiador de agua de camisas

1.1.2 Intercambiadores de aire de barrido

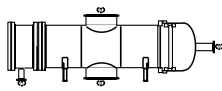
Aspen Exchanger Design and Rating Shell & Tube V12

File: C:\Users\Usuario\Desktop\int sub con aire\aire de barrido.EDR

Printed: 02/07/2021 at 5:09:01

TEMA Sheet

Heat Exchanger Specification Sheet

1	Company:										
2	Location:										
3	Service of Unit:	Our Reference:									
4	Item No.:	Your Reference:									
5	Date:	Rev No.:	Job No.:								
6	Size:	940 - 2889,25 mm	Type:	AXS Horizontal	Connected in:	1 parallel	1 series				
7	Surf/unit(eff.)	135,9 m²	Shells/unit	1	Surf/shell(eff.)	135,9 m²					
8	PERFORMANCE OF ONE UNIT										
9	Fluid allocation	Shell Side		Tube Side							
10	Fluid name	10		3							
11	Fluid quantity, Total	kg/s		49,89			25,0066				
12	Vapor (In/Out)	kg/s		49,89	49,89	0	0				
13	Liquid	kg/s		0	0	25,0066	25,0066				
14	Noncondensable	kg/s		0	0	0	0				
15											
16	Temperature (In/Out)	°C		167	140,72	80,11	115,44				
17	Bubble / Dew point	°C		/	/	/	/				
18	Density Vapor/Liquid	kg/m³		2,55 /	2,44 /	/ 1238,62	/ 1038,55				
19	Viscosity	mPa-s		0,0246 /	0,0236 /	/ 0,1962	/ 0,1134				
20	Molecular wt, Vap			28,95	28,95						
21	Molecular wt, NC										
22	Specific heat	kJ/(kg-K)		1,017 /	1,013 /	/ 1,361	/ 1,702				
23	Thermal conductivity	W/(m-K)		0,0356 /	0,0339 /	/ 0,0622	/ 0,0512				
24	Latent heat	kJ/kg									
25	Pressure (abs)	bar		3,22	2,89719	24,69293	24,64706				
26	Velocity (Mean/Max)	m/s		41,3 / 42,44		0,14 / 0,16					
27	Pressure drop, allow./calc.	bar		0,5	0,32281	0,5	0,04587				
28	Fouling resistance (min)	m²-K/W		0,00018		0,00018	0,00023 Ao based				
29	Heat exchanged	1328,4	kW		MTD (corrected)		53,07 °C				
30	Transfer rate, Service	184,2	Dirty		184,2	Clean	198,9 W/(m²-K)				
31	CONSTRUCTION OF ONE SHELL					Sketch					
32			Shell Side		Tube Side						
33	Design/Vacuum/test pressure	bar	4,13686 /	/	27,57904 /	/					
34	Design temperature / MDMT	°C	204,44 /	/	154,44 /	/					
35	Number passes per shell		1		1						
36	Corrosion allowance	mm	1,59		1,59						
37	Connections	In	mm	1 641,35 / -	1 102,26 / -						
38	Size/Rating	Out	1 641,35 / -	1 154,05 / -							
39	ID	Intermediate	/	-	/	-					
40	Tube #	891	OD: 19,05	Tks, Average 2,11	mm	Length: 2889,25		mm	Pitch: 23,81	mm	Tube pattern: 30
41	Tube type:	Plain	Insert: None	Fin #:	#/m	Material: Carbon Steel					
42	Shell	Carbon Steel	ID 939,8	OD 958,85	mm	Shell cover	Carbon Steel				
43	Channel or bonnet	Carbon Steel				Channel cover	Carbon Steel				
44	Tube sheet-stationary	Carbon Steel	-			Tube sheet-floating	Carbon Steel				
45	Floating head cover	Carbon Steel				Impingement protection	None				
46	Baffle-cross	Carbon Steel	Type	Unbaffled	Cut(%d)	Spacing: c/c	mm				
47	Baffle-long	-	Seal Type			Inlet	mm				
48	Supports-tube	U-bend	0	Type							
49	Bypass seal		Tube-tube sheet joint	Expanded only (2 grooves)(App.A 'i')							
50	Expansion joint	-	Type	None							
51	RhoV2-Inlet nozzle	9365	Bundle entrance	3719	Bundle exit	4499	kg/(m-s²)				
52	Gaskets - Shell side	Flat Metal Jacket Fibe	Tube side	Flat Metal Jacket Fibe							
53	Floating head	Flat Metal Jacket Fibe									
54	Code requirements	ASME Code Sec VIII Div 1	TEMA class	C - general service							
55	Weight/Shell	7241,9	Filled with water	9812,1	Bundle	3150,6	kg				
56	Remarks										
57											
58											

1.1.3 Intercambiador de Therminol 55

Aspen Exchanger Design and Rating Shell & Tube V12

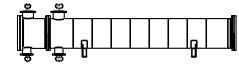
File: C:\Users\Usuario\Desktop\int sub con aire\therminol55.EDR

Printed: 02/07/2021 at 5:10:39

TEMA Sheet

Heat Exchanger Specification Sheet

1	Company:					
2	Location:					
3	Service of Unit:			Our Reference:		
4	Item No.:			Your Reference:		
5	Date:	Rev No.:	Job No.:			
6	Size:	610 - 3657,6 mm	Type:	AFN Horizontal	Connected in:	1 parallel 1 series
7	Surf/unit(eff.)	101,5 m²	Shells/unit	1	Surf/shell(eff.)	101,5 m²
8	PERFORMANCE OF ONE UNIT					
9	Fluid allocation		Shell Side		Tube Side	
10	Fluid name		12		4	
11	Fluid quantity, Total		kg/h 91501		90024	
12	Vapor (In/Out)		kg/h 0 0		0 90024	
13	Liquid		kg/h 91501 91501		90024 0	
14	Noncondensable		kg/h 0 0		0 0	
15						
16	Temperature (In/Out)		°C 175 139,32		115 121,17	
17	Bubble / Dew point		°C / /		118,04 / 121,07 117,94 / 120,88	
18	Density Vapor/Liquid		kg/m³ / 765,94 / 790,86		/ 1041,09 194,89 /	
19	Viscosity		cp / 0,9675 / 1,4699		/ 0,1141 0,018 /	
20	Molecular wt, Vap				152,04	
21	Molecular wt, NC					
22	Specific heat		kJ/(kg-K) / 2,457 / 2,331		/ 1,694 1,918 /	
23	Thermal conductivity		W/(m-K) / 0,1104 / 0,1146		/ 0,0512 0,028 /	
24	Latent heat		kcal/kg		17,98 18,06	
25	Pressure (abs)		bar 1,5 1,1687		24,19299 24,10388	
26	Velocity (Mean/Max)		m/s 0,76 / 0,92		0,98 / 3,12	
27	Pressure drop, allow./calc.		bar 0,5 0,3313		0,5 0,08911	
28	Fouling resistance (min)		m²-h-C/kcal 0,0002		0,0002 0,00026 Ao based	
29	Heat exchanged		1866615 kcal/h		MTD (corrected) 35,66 °C	
30	Transfer rate, Service		515,8 Dirty 515,7 Clean 679,6		kcal/(h-m²-C)	
31	CONSTRUCTION OF ONE SHELL					
32			Shell Side		Tube Side	
33	Design/Vacuum/test pressure		bar 3,44738 / /		26,88957/ /	
34	Design temperature / MDMT		°C 210 / /		210 / /	
35	Number passes per shell		2		2	
36	Corrosion allowance		mm 1,59		1,59	
37	Connections		In mm 1 202,72 / -		1 154,05 / -	
38	Size/Rating		Out 1 154,05 / -		1 202,72 / -	
39	ID		Intermediate / -		/ -	
40	Tube #: 476 OD: 19,05 Tks, Average 2,11 mm Length: 3657,6 mm Pitch: 23,81 mm Tube pattern:30					
41	Tube type: Plain		Insert:None		Fin# #/m Material:Carbon Steel	
42	Shell Carbon Steel		ID 609,6 OD 625,48 mm		Shell cover -	
43	Channel or bonnet Carbon Steel				Channel cover Carbon Steel	
44	Tubesheet-stationary Carbon Steel				Tubesheet-floating -	
45	Floating head cover -				Impingement protection None	
46	Baffle-cross Carbon Steel		Type Single segmental Cut(%d) 39,85		VertiSpacing: c/c 381 mm	
47	Baffle-long Carbon Steel		Seal Type		Inlet 447,68 mm	
48	Supports-tube U-bend		0		Type	
49	Bypass seal		Tube-tubesheet joint		Expanded only (2 grooves)(App.A 'i')	
50	Expansion joint -		Type None			
51	RhoV2-Inlet nozzle 810		Bundle entrance 354		Bundle exit 619 kg/(m-s²)	
52	Gaskets - Shell side -		Tube side		Flat Metal J acket Fibe	
53	Floating head -					
54	Code requirements ASME Code Sec VIII Div 1		TEMA class C - general service			
55	Weight/Shell 3355,6		Filled with water 4477,5		Bundle 1858,2 kg	
56	Remarks					
57						
58						



1.1.4 Condensador

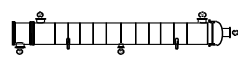
Aspen Exchanger Design and Rating Shell & Tube V12

File: C:\Users\Usuario\Desktop\int sub con aire\Condensador.EDR

Printed: 02/07/2021 at 5:11:53

TEMA Sheet

Heat Exchanger Specification Sheet

1	Company:										
2	Location:										
3	Service of Unit:	Our Reference:									
4	Item No.:	Your Reference:									
5	Date:	Rev No.:	Job No.:								
6	Size:	914 - 7500 mm	Type:	AIS Horizontal		Connected in:	1 parallel 1 series				
7	Surf/unit(eff.)	422,3 m ²	Shells/unit	1		Surf/shell(eff.)	422,3 m ²				
8	PERFORMANCE OF ONE UNIT										
9	Fluid allocation	Shell Side		Tube Side							
10	Fluid name	6		14							
11	Fluid quantity, Total	25,0066 kg/s		209,4469							
12	Vapor (In/Out)	kg/s	25,0066	0	0	0					
13	Liquid	kg/s	0	25,0066	209,4469	209,4469					
14	Noncondensable	kg/s	0	0	0	0					
15											
16	Temperature (In/Out)	°C	64,64	39,8	25	29,86					
17	Bubble / Dew point	°C	40,61 / 44,52	40,34 / 44,18	/	/					
18	Density Vapor/Liquid	kg/m ³	22,97 /	/ 1377,88	/ 997,07	/ 995,71					
19	Viscosity	mPa-s	0,0124 /	/ 0,3138	/ 0,89	/ 0,7996					
20	Molecular wt, Vap		152,04								
21	Molecular wt, NC										
22	Specific heat	kJ/(kg-K)	0,94 /	/ 1,262	/ 4,181	/ 4,179					
23	Thermal conductivity	W/(m-K)	0,0171 /	/ 0,0741	/ 0,6065	/ 0,6142					
24	Latent heat	kJ/kg	145,5	145,7							
25	Pressure (abs)	bar	3,87428	3,83508	1,5	1,3324					
26	Velocity (Mean/Max)	m/s	1,46 / 3,27		1,25 / 1,25						
27	Pressure drop, allow./calc.	bar	0,5	0,0392	0,5	0,16761					
28	Fouling resistance (min)	m ² -K/W	0,00018		0,00018	0,00023 Ao based					
29	Heat exchanged	4253,2 kW	MTD (corrected)		15,42 °C						
30	Transfer rate, Service	653,4	Dirty	653,3	Clean	886 W/(m ² -K)					
31	CONSTRUCTION OF ONE SHELL					Sketch					
32		Shell Side	Tube Side								
33	Design/Vacuum/test pressure	bar	4,82633 /	3,44738 /							
34	Design temperature / MDMT	°C	104,44 /	65,56 /							
35	Number passes per shell		1	1							
36	Corrosion allowance	mm	1,59								
37	Connections	In mm	2 304,8 /	1 304,8 /							
38	Size/Rating	Out	1 154,05 /	1 336,55 /							
39	ID	Intermediate	/	/							
40	Tube #	972	OD: 19,05	Tks. Average 2,11	mm	Length: 7500	mm	Pitch: 23,81	mm	Tube pattern:90	
41	Tube type:	Plain	Insert:	None	Fin#	#/m	Material:	Carbon Steel			
42	Shell	Carbon Steel	ID	914,4	OD	933,45	mm	Shell cover	Carbon Steel		
43	Channel or bonnet	Carbon Steel					Channel cover	Carbon Steel			
44	Tubesheet-stationary	Carbon Steel	Carbon Steel				Tubesheet-floating	Carbon Steel			
45	Floating head cover	Carbon Steel					Impingement protection	None			
46	Baffle-cross	Carbon Steel	Type	Single segmental	Cut(%d)	39,58	VertiSpacing: c/c	527,05	mm		
47	Baffle-long	-	Seal Type					Inlet	899,1	mm	
48	Supports-tube	U-bend	0	Type							
49	Bypass seal	Tube-tubesheet joint				Expanded only (2 grooves)(App.A 'i')					
50	Expansion joint	-	Type	None							
51	RhoV2-Inlet nozzle	1278	Bundle entrance	356	Bundle exit	29	kg/(m-s ²)				
52	Gaskets - Shell side	Flat Metal J acket Fibe		Tube side	Flat Metal J acket Fibe						
53	Floating head	Flat Metal J acket Fibe									
54	Code requirements	ASME Code Sec VIII Div 1			TEMA class	C - general service					
55	Weight/Shell	10649,1	Filled with water	15938,8	Bundle	7361,1	kg				
56	Remarks										
57											
58											

1.2 Ciclo transcrito con aire de barrido

1.2.1 Intercambiador de agua de camisas

Aspen Exchanger Design and Rating Shell & Tube V12

File: C:\Users\Usuario\Desktop\int super con aire\Agua de camisas.EDR

Printed: 02/07/2021 at 5:27:37

TEMA Sheet

Heat Exchanger Specification Sheet

1	Company:														
2	Location:														
3	Service of Unit:					Our Reference:									
4	Item No.:					Your Reference:									
5	Date:	Rev No.:	Job No.:												
6	Size:	533	-	8000	mm	Type:	AEN	Horizontal	Connected in:	1 parallel	1 series				
7	Surf/unit(eff.)	164,4	m ²		Shells/unit	1	Surf/shell(eff.)		164,4	m ²					
8	PERFORMANCE OF ONE UNIT														
9	Fluid allocation				Shell Side				Tube Side						
10	Fluid name				8				2						
11	Fluid quantity, Total				kg/s				33,1						
12	Vapor (In/Out)				kg/s				0 0 0 0						
13	Liquid				kg/s				33,1 33,1 36,2783 36,2783						
14	Noncondensable				kg/s				0 0 0 0						
15															
16	Temperature (In/Out)				°C				85 72,54 42,95 75,32						
17	Bubble / Dew point				°C				/ / / /						
18	Density Vapor/Liquid				kg/m ³				/ 968,7 / 976,38 / 1125,29 / 999,9						
19	Viscosity				mPa-s				/ 0,3331 / 0,39 / 0,1654 / 0,1127						
20	Molecular wt, Vap														
21	Molecular wt, NC														
22	Specific heat				kJ/(kg-K)				/ 4,2 / 4,191 / 1,406 / 1,561						
23	Thermal conductivity				W/(m-K)				/ 0,6702 / 0,6618 / 0,0713 / 0,0616						
24	Latent heat kJ/kg														
25	Pressure (abs)				bar				3 2,73386 45 44,95272						
26	Velocity (Mean/Max)				m/s				0,53 / 0,56 0,57 / 0,6						
27	Pressure drop, allow./calc.				bar				0,5 0,26615 0,5 0,04729						
28	Fouling resistance (min)				m ² -K/W				0,00018 0,00018 0,00023 Ao based						
29	Heat exchanged		1731,5	kW		MTD (corrected)		17,55	°C						
30	Transfer rate, Service		600,3	Dirty		600,3	Clean		791,2	W/(m ² -K)					
31	CONSTRUCTION OF ONE SHELL										Sketch				
32					Shell Side				Tube Side						
33	Design/Vacuum/test pressure				bar				3,44738 / / 49,64227/ /						
34	Design temperature / MDMT				°C				121,11 / / 121,11 /						
35	Number passes per shell								1 1						
36	Corrosion allowance				mm				1,59 1,59						
37	Connections		In	mm		1	202,72 / -	1	154,05 / -						
38	Size/Rating		Out			1	154,05 / -	1	154,05 / -						
39	ID		Intermediate			-	/ -	-	/ -						
40	Tube #	348	OD:	19,05	Tks. Average	2,11	mm	Length:	8000	mm	Pitch:	23,81	mm	Tube pattern:	30
41	Tube type:	Plain	Insert:	None	Fin#		#/m	Material:	Carbon Steel						
42	Shell	Carbon Steel	ID	539,75	OD	558,8	mm	Shell cover	-						
43	Channel or bonnet	Carbon Steel					Channel cover	Carbon Steel							
44	Tubesheet-stationary	Carbon Steel					Tubesheet-floating	-							
45	Floating head cover	-					Impingement protection	None							
46	Baffle-cross	Carbon Steel	Type	Single segmental	Cut(%d)	38,54	Hori:Spacing:	c/c 279,4	mm						
47	Baffle-long	-	Seal Type					Inlet	453,52	mm					
48	Supports-tube	U-bend	0					Type							
49	Bypass seal					Tube-tubesheet joint	Expanded only (2 grooves)(App.A 'i')								
50	Expansion joint	-					Type	None							
51	RhoV2-Inlet nozzle	1086					Bundle entrance	310	Bundle exit	617	kg/(m-s ²)				
52	Gaskets - Shell side	-					Tube side	Flat Metal Jacket Fibre							
53	Floating head	-													
54	Code requirements	ASME Code Sec VIII Div 1				TEMA class	C - general service								
55	Weight/Shell	5149,5	Filled with water	6839,2	Bundle	2756,6	kg								
56	Remarks														
57															
58															

1.2.2 Intercambiadores de aire de barrido

Aspen Exchanger Design and Rating Shell & Tube V12

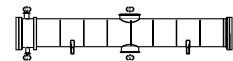
File: C:\Users\Usuario\Desktop\int super con aire\Aire de barrido.EDR

Printed: 02/07/2021 at 5:28:26

TEMA Sheet

Heat Exchanger Specification Sheet

1	Company:									
2	Location:									
3	Service of Unit:					Our Reference:				
4	Item No.:					Your Reference:				
5	Date:			Rev No.:			Job No.:			
6	Size: 1346 - 9000		mm		Type: CXN		Horizontal		Connected in: 1 parallel 1 series	
7	Surf/unit(eff.)		1025,2		m²		Shells/unit 1		Surf/shell(eff.) 1025,2 m²	
8	PERFORMANCE OF ONE UNIT									
9	Fluid allocation				Shell Side			Tube Side		
10	Fluid name				10			3		
11	Fluid quantity, Total				kg/s			49,89		
12	Vapor (In/Out)				kg/s		49,89		49,89	
13	Liquid				kg/s		0		0	
14	Noncondensable				kg/s		0		0	
15										
16	Temperature (In/Out)				°C		167		92,31	
17	Bubble / Dew point				°C		/		/	
18	Density Vapor/Liquid				kg/m³		2,55 /		3,01 /	
19	Viscosity				mPa-s		0,0246 /		0,0215 /	
20	Molecular wt, Vap						28,95		28,95	
21	Molecular wt, NC									
22	Specific heat				kJ/(kg-K)		1,014 /		1,005 /	
23	Thermal conductivity				W/(m-K)		0,0356 /		0,0307 /	
24	Latent heat				kJ/kg				20,9	
25	Pressure (abs)				bar		3,22		3,15859	
26	Velocity (Mean/Max)				m/s		8,55 / 8,72		0,58 / 0,86	
27	Pressure drop, allow./calc.				bar		0,5		0,06141	
28	Fouling resistance (min)				m²-K/W		0,00018		0,00018 0,00023 Ao based	
29	Heat exchanged		3761,2		kW		MTD (corrected)		22,53 °C	
30	Transfer rate, Service		162,9		Dirty		162,8		Clean 174,2 W/(m²-K)	
31	CONSTRUCTION OF ONE SHELL									
32					Shell Side			Tube Side		
33	Design/Vacuum/test pressure				bar		4,13686 /		48,9528 /	
34	Design temperature / MDMT				°C		204,44 /		160 /	
35	Number passes per shell						1		4	
36	Corrosion allowance				mm		1,59		1,59	
37	Connections		In		mm		1 895,35 /		- 1 154,05 /	
38	Size/Rating		Out				1 793,75 /		- 1 202,72 /	
39	ID		Intermediate				/		/	
40	Tube #		1960		OD: 19,05		Tks. Average 2,11		mm Length: 9000 mm Pitch: 23,81 mm Tube pattern:30	
41	Tube type:		Plain		Insert:None		Fin#		#/m Material:Carbon Steel	
42	Shell		Carbon Steel		ID 1346,2		OD 1371,6		mm Shell cover -	
43	Channel or bonnet		Carbon Steel						Channel cover Carbon Steel	
44	Tubesheet-stationary		Carbon Steel						Tubesheet-floating -	
45	Floating head cover		-						Impingement protection None	
46	Baffle-cross		Carbon Steel		Type Unbaffled		Cut(%d)		Spacing: c/c mm	
47	Baffle-long		-		Seal Type				Inlet mm	
48	Supports-tube		U-bend		0		Type			
49	Bypass seal				Tube-tubesheet joint		Expanded only (2 grooves)(App.A 'i')			
50	Expansion joint		-		Type		None			
51	RhoV2-Inlet nozzle		2465		Bundle entrance 184		Bundle exit 213		kg/(m-s²)	
52	Gaskets - Shell side		-		Tube side		Flat Metal J acket Fibe			
53	Floating head		-							
54	Code requirements		ASME Code Sec VIII Div 1		TEMA class		C - general service			
55	Weight/Shell		34071,9		Filled with water 46587,7		Bundle 18819,6		kg	
56	Remarks									
57										
58										



1.2.3 Intercambiador de Therminol 55

Aspen Exchanger Design and Rating Shell & Tube V12

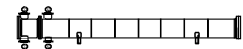
File: C:\Users\Usuario\Desktop\int super con aire\therminol55.EDR

Printed: 02/07/2021 at 5:29:09

TEMA Sheet

Heat Exchanger Specification Sheet

1	Company:									
2	Location:									
3	Service of Unit:					Our Reference:				
4	Item No.:					Your Reference:				
5	Date:		Rev No.:			Job No.:				
6	Size: 533 - 5562,6		mm		Type:	AFN Horizontal		Connected in: 1 parallel 1 series		
7	Surf/unit(eff.)		108,6		m ²		Shells/unit 1		Surf/shell(eff.) 108,6 m ²	
8	PERFORMANCE OF ONE UNIT									
9	Fluid allocation					Shell Side			Tube Side	
10	Fluid name					12			4	
11	Fluid quantity, Total					kg/s 25,7826			36,2783	
12	Vapor (In/Out)					kg/s 0		0		36,2783
13	Liquid					kg/s 25,7826		25,7826		0
14	Noncondensable					kg/s 0		0		0
15										
16	Temperature (In/Out)					°C 175		139,91		120
17	Bubble / Dew point					°C /		/		/
18	Density Vapor/Liquid		kg/m ³		/ 765,94		/ 790,46		479,72 /	245,09 /
19	Viscosity		mPa-s		/ 0,9675		/ 1,4584		0,0315 /	0,0216 /
20	Molecular wt, Vap									114,04
21	Molecular wt, NC									114,04
22	Specific heat					kJ/(kg-K) / 2,457		/ 2,334		6,65 /
23	Thermal conductivity					W/(m-K) / 0,1104		/ 0,1146		0,0509 /
24	Latent heat					kJ/kg				0,0329 /
25	Pressure (abs)					bar 1,5		1,17042		44
26	Velocity (Mean/Max)					m/s 0,57 / 1,12				3,48 / 5,1
27	Pressure drop, allow./calc.					bar 0,5		0,32958		0,5
28	Fouling resistance (min)					m ² -K/W 0,00018				0,00018 0,00023 Ao based
29	Heat exchanged		2167,1		kW		MTD (corrected)		29,03 °C	
30	Transfer rate, Service		687,5		Dirty		687,4		Clean 949,9 W/(m ² -K)	
31	CONSTRUCTION OF ONE SHELL								Sketch	
32						Shell Side			Tube Side	
33	Design/Vacuum/test pressure					bar 3,44738 / /		48,9528 / /		
34	Design temperature / MDMT					°C 210 /		176,67 /		
35	Number passes per shell					2		2		
36	Corrosion allowance					mm 1,59		1,59		
37	Connections		In mm		1 202,72 / -		1 202,72 / -			
38	Size/Rating		Out		1 154,05 / -		1 202,72 / -			
39	ID		Intermediate		/ -		/ -			
40	Tube #:		333		OD: 19,05		Tks. Average 2,11		mm Length: 5562,6 mm Pitch: 23,81 mm Tube pattern:30	
41	Tube type:		Plain		Insert:None		Fin#		#m Material:Carbon Steel	
42	Shell		Carbon Steel		ID 539,75		OD 558,8		mm Shell cover -	
43	Channel or bonnet		Carbon Steel						Channel cover Carbon Steel	
44	Tubesheet-stationary		Carbon Steel		Carbon Steel				Tubesheet-floating -	
45	Floating head cover		-						Impingement protection None	
46	Baffle-cross		Carbon Steel		Type Single segmental		Cut(%d) 38,54		VertiSpacing: c/c 654,05 mm	
47	Baffle-long		Carbon Steel		Seal Type				Inlet 762 mm	
48	Supports-tube		U-bend		0				Type	
49	Bypass seal				Tube-tubesheet joint		Expanded only (2 grooves)(App.A 'i')			
50	Expansion joint		-		Type None					
51	RhoV2-Inlet nozzle		833		Bundle entrance 89		Bundle exit 180		kg/(m-s ²)	
52	Gaskets - Shell side		-		Tube side		Flat Metal J		acket Fibe	
53	Floating head		-							
54	Code requirements		ASME Code Sec VIII Div 1		TEMA class C - general service					
55	Weight/Shell		4282,9		Filled with water 5500,3		Bundle 2150,9		kg	
56	Remarks									
57										
58										



1.2.4 Condensador

Aspen Exchanger Design and Rating Shell & Tube V12

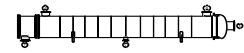
File: C:\Users\Usuario\Desktop\int sub con aire\Condensador.EDR

Printed: 02/07/2021 at 5:30:11

TEMA Sheet

Heat Exchanger Specification Sheet

1	Company:									
2	Location:									
3	Service of Unit:					Our Reference:				
4	Item No.:					Your Reference:				
5	Date:			Rev No.:			Job No.:			
6	Size:	914	-	7500	mm	Type:	AIS Horizontal		Connected in: 1 parallel 1 series	
7	Surf/unit(eff.)	422,3			m ²	Shells/unit	1			Surf/shell(eff.) 422,3 m ²
8	PERFORMANCE OF ONE UNIT									
9	Fluid allocation					Shell Side			Tube Side	
10	Fluid name					6			14	
11	Fluid quantity, Total					25,0066			209,4469	
12	Vapor (In/Out)					kg/s	25,0066	0	0	0
13	Liquid					kg/s	0	25,0066	209,4469	209,4469
14	Noncondensable					kg/s	0	0	0	0
15										
16	Temperature (In/Out)					°C	64,64	39,8	25	29,86
17	Bubble / Dew point					°C	40,61 / 44,52	40,34 / 44,18	/	/
18	Density Vapor/Liquid					kg/m ³	22,97 /	/ 1377,88	/ 997,07	/ 995,71
19	Viscosity					mPa-s	0,0124 /	/ 0,3138	/ 0,89	/ 0,7996
20	Molecular wt, Vap						152,04			
21	Molecular wt, NC									
22	Specific heat					kJ/(kg-K)	0,94 /	/ 1,262	/ 4,181	/ 4,179
23	Thermal conductivity					W/(m-K)	0,0171 /	/ 0,0741	/ 0,6065	/ 0,6142
24	Latent heat					kJ/kg	145,5	145,7		
25	Pressure (abs)					bar	3,87428	3,83508	1,5	1,3324
26	Velocity (Mean/Max)					m/s	1,46 / 3,27		1,25 / 1,25	
27	Pressure drop, allow./calc.					bar	0,5	0,0392	0,5	0,16761
28	Fouling resistance (min)					m ² -K/W	0,00018		0,00018	0,00023 Ao based
29	Heat exchanged					4253,2 kW	MTD (corrected)			15,42 °C
30	Transfer rate, Service					653,4	Dirty	653,3	Clean	886 W/(m ² -K)
31	CONSTRUCTION OF ONE SHELL									
32						Shell Side			Tube Side	
33	Design/Vacuum/test pressure					bar	4,82633 /	/	3,44738 /	/
34	Design temperature / MDMT					°C	104,44 /	/	65,56 /	/
35	Number passes per shell						1		1	
36	Corrosion allowance					mm	1,59		1,59	
37	Connections					In	mm	2 304,8 /	-	1 304,8 / -
38	Size/Rating					Out	mm	1 154,05 /	-	1 336,55 / -
39	ID					Intermediate	/ -		/ -	
40	Tube # 972 OD: 19,05 Tks, Average 2,11 mm Length: 7500 mm Pitch: 23,81 mm Tube pattern:90									
41	Tube type: Plain Insert:None Fin# #/m Material:Carbon Steel									
42	Shell Carbon Steel ID 914,4 OD 933,45 mm					Shell cover Carbon Steel				
43	Channel or bonnet Carbon Steel					Channel cover Carbon Steel				
44	Tubesheet-stationary Carbon Steel Carbon Steel					Tubesheet-floating Carbon Steel				
45	Floating head cover Carbon Steel					Impingement protection None				
46	Baffle-cross Carbon Steel Type Single segmental Cut(%d) 39,58					VertiSpacing: c/c 527,05 mm				
47	Baffle-long - Seal Type					Inlet 899,1 mm				
48	Supports-tube U-bend 0					Type				
49	Bypass seal					Tube-tubesheet joint Expanded only (2 grooves)(App.A 'i')				
50	Expansion joint - Type None									
51	RhoV2-Inlet nozzle 1278					Bundle entrance 356		Bundle exit 29 kg/(m-s ²)		
52	Gaskets - Shell side Flat Metal J acket Fibe					Tube side Flat Metal J acket Fibe				
53	Floating head Flat Metal J acket Fibe									
54	Code requirements ASME Code Sec VIII Div 1					TEMA class C - general service				
55	Weight/Shell 10649,1 Filled with water 15938,8					Bundle 7361,1 kg				
56	Remarks									
57										
58										



1.3 Ciclo subcrítico sin aire de barrido

1.3.1 Intercambiador de agua de camisas

Aspen Exchanger Design and Rating Shell & Tube V12

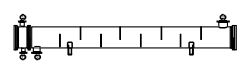
File: C:\Users\Usuario\Desktop\int sub sin aire\Agua de camisas.EDR

Printed: 02/07/2021 at 5:36:21

TEMA Sheet

Heat Exchanger Specification Sheet

1	Company:									
2	Location:									
3	Service of Unit:					Our Reference:				
4	Item No.:					Your Reference:				
5	Date:		Rev No.:			Job No.:				
6	Size:	533 - 5124,45	mm	Type:	AEN	Horizontal	Connected in:	1 parallel	1 series	
7	Surf/unit(eff.)	106,1	m²	Shells/unit	1		Surf/shell(eff.)	106,1	m²	
8	PERFORMANCE OF ONE UNIT									
9	Fluid allocation				Shell Side			Tube Side		
10	Fluid name				8			2		
11	Fluid quantity, Total				kg/s			33,1		
12	Vapor (In/Out)				kg/s			0 0 0 0		
13	Liquid				kg/s			33,1 33,1 15,53 15,53		
14	Noncondensable				kg/s			0 0 0 0		
15										
16	Temperature (In/Out)				°C			85 79,19 41,23 80,5		
17	Bubble / Dew point				°C			/ / / /		
18	Density Vapor/Liquid				kg/m³			/ 968,7 / 972,38 / 1383,44 / 1236,74		
19	Viscosity				mPa·s			/ 0,3331 / 0,3577 / 0,3217 / 0,195		
20	Molecular wt, Vap									
21	Molecular wt, NC									
22	Specific heat				kJ/(kg·K)			/ 4,2 / 4,195 / 1,253 / 1,363		
23	Thermal conductivity				W/(m·K)			/ 0,6702 / 0,6666 / 0,075 / 0,0621		
24	Latent heat				kJ/kg					
25	Pressure (abs)				bar			3 2,91008 24,69293 24,50868		
26	Velocity (Mean/Max)				m/s			0,4 / 0,48 0,78 / 0,88		
27	Pressure drop, allow./calc.				bar			0,5 0,08992 0,5 0,18425		
28	Fouling resistance (min)				m²·K/W			0,00018 0,00018 0,00023 Ao based		
29	Heat exchanged				kW			807,4 MTD (corrected) 11,43 °C		
30	Transfer rate, Service				Dirty			Clean		
31	666				666,1			909,7 W/(m²·K)		
32	CONSTRUCTION OF ONE SHELL									
33	Design/Vacuum/test pressure				bar			3,44738 / / 27,57904/ /		
34	Design temperature / MDMT				°C			121,11 / / 115,56 / /		
35	Number passes per shell							1 4		
36	Corrosion allowance				mm			1,59 1,59		
37	Connections		In		mm		mm			
38	Size/Rating		Out		mm		mm			
39	ID		Intermediate		mm		mm			
40	Tube #	352	OD:	19,05	Tks. Average	2,11	mm	Length:	5124,45	mm
41	Tube type:	Plain	Insert:	None	Fin#		#/m	Material:	Carbon Steel	
42	Shell	Carbon Steel	ID	539,75	OD	558,8	mm	Shell cover	-	
43	Channel or bonnet	Carbon Steel						Channel cover	Carbon Steel	
44	Tubesheet-stationary	Carbon Steel						Tubesheet-floating	-	
45	Floating head cover	-						Impingement protection	None	
46	Baffle-cross	Carbon Steel	Type	Single segmental	Cut(%d)	40,3	Horiz:Spacing:	c/c 508	mm	
47	Baffle-long	-	Seal Type				Inlet	739,78	mm	
48	Supports-tube	U-bend		0	Type					
49	Bypass seal		Tube-tubesheet joint		Expanded only (2 grooves)(App.A 'i')					
50	Expansion joint	-	Type	None						
51	RhoV2-Inlet nozzle	1086	Bundle entrance	200	Bundle exit	214			kg/(m·s²)	
52	Gaskets - Shell side	-	Tube side		Flat Metal	Jacket Fibe				
53	Floating head	-								
54	Code requirements	ASME Code Sec VIII Div 1			TEMA class	C - general service				
55	Weight/Shell	3222,3	Filled with water	4307,6	Bundle	1795,2			kg	
56	Remarks									
57										
58										



1.3.2 Intercambiador de therminol 55

Aspen Exchanger Design and Rating Shell & Tube V12

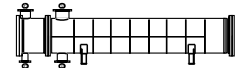
File: C:\Users\Usuario\Desktop\int sub sin aire\Evaporador de therminol.EDR

Printed: 02/07/2021 at 5:37:21

TEMA Sheet

Heat Exchanger Specification Sheet

1	Company:										
2	Location:										
3	Service of Unit:					Our Reference:					
4	Item No.:					Your Reference:					
5	Date:		Rev No.:			Job No.:					
6	Size:	584 - 3000	mm	Type:	AFN	Horizontal	Connected in:		1 parallel	1 series	
7	Surf/unit(eff.)	71,8	m²	Shells/unit	1	Surf/shell(eff.)	71,8	m²			
8	PERFORMANCE OF ONE UNIT										
9	Fluid allocation					Shell Side		Tube Side			
10	Fluid name					12		3			
11	Fluid quantity, Total					25,417		15,53			
12	Vapor (In/Out)					0	0	0	15,53		
13	Liquid					25,417	25,417	15,53	0		
14	Noncondensable					0	0	0	0		
15											
16	Temperature (In/Out)					175	139,47	80	120,82		
17	Bubble / Dew point					/	/	112,86 / 121,07	110,66 / 120,59		
18	Density Vapor/Liquid					/ 765,94	/ 790,76	/ 1238,61	193,48 /		
19	Viscosity					/ 0,9675	/ 1,4665	/ 0,1961	0,0179 /		
20	Molecular wt, Vap								152,04		
21	Molecular wt, NC										
22	Specific heat					/ 2,457	/ 2,332	/ 1,361	1,909 /		
23	Thermal conductivity					/ 0,1104	/ 0,1146	/ 0,0622	0,0279 /		
24	Latent heat							75,1	75,9		
25	Pressure (abs)					1,5	1,07822	24,19293	23,96834		
26	Velocity (Mean/Max)					0,87 / 1,06		1,21 / 4,48			
27	Pressure drop, allow./calc.					0,5	0,42178	0,5	0,22459		
28	Fouling resistance (min)					0,00018		0,00018	0,00023	Ao based	
29	Heat exchanged		2162,3	kW		MTD (corrected)		46,11	°C		
30	Transfer rate, Service		652,8	Dirty		652,7	Clean	885	W/(m²-K)		
31	CONSTRUCTION OF ONE SHELL							Sketch			
32						Shell Side		Tube Side			
33	Design/Vacuum/test pressure					bar	3,44738 / /	26,88957/ /			
34	Design temperature / MDMT					°C	210 / /	210 / /			
35	Number passes per shell					2		4			
36	Corrosion allowance					mm	1,59	1,59			
37	Connections		In	mm	1	202,72 / -	1	90,12 / -			
38	Size/Rating		Out		1	154,05 / -	1	154,05 / -			
39	ID		Intermediate		/	-	/	-			
40	Tube #	415	OD:	19,05	Tks. Average	2,11	mm	Length:	3000	mm	
41	Tube type:	Plain	Insert:	None	Fin#		#/m	Material:	Carbon Steel		
42	Shell	Carbon Steel	ID	590,55	OD	609,6	mm	Shell cover	-		
43	Channel or bonnet	Carbon Steel						Channel cover	Carbon Steel		
44	Tubesheet-stationary	Carbon Steel						Tubesheet-floating	-		
45	Floating head cover	-						Impingement protection	None		
46	Baffle-cross	Carbon Steel	Type	Single segmental	Cut(%d)	40,33	VertiSpacing: c/c	311,15	mm		
47	Baffle-long	Carbon Steel	Seal Type						Inlet	381	mm
48	Supports-tube	U-bend	0		Type						
49	Bypass seal				Tube-tubesheet joint	Expanded only (2 grooves)(App.A 'i')					
50	Expansion joint	-				Type	None				
51	RhoV2-Inlet nozzle	810	Bundle entrance		462	Bundle exit		718	kg/(m-s²)		
52	Gaskets - Shell side	-	Tube side			Flat Metal J acket Fibe					
53	Floating head	-									
54	Code requirements	ASME Code Sec VIII Div 1			TEMA class	C - general service					
55	Weight/Shell	2800,4	Filled with water	3673,3	Bundle	1413,2	kg				
56	Remarks										
57											
58											



1.3.3 Condensador

Aspen Exchanger Design and Rating Shell & Tube V12

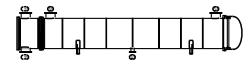
File: C:\Users\Usuario\Desktop\int sub sin aire\Condensador.EDR

Printed: 02/07/2021 at 5:39:02

TEMA Sheet

Heat Exchanger Specification Sheet

1	Company:									
2	Location:									
3	Service of Unit:					Our Reference:				
4	Item No.:					Your Reference:				
5	Date:		Rev No.:			Job No.:				
6	Size: 940 - 5700		mm		Type: AIS Horizontal		Connected in: 1 parallel 1 series			
7	Surf/unit(eff.)		319,1		m²		Shells/unit 1		Surf/shell(eff.) 319,1 m²	
8	PERFORMANCE OF ONE UNIT									
9	Fluid allocation				Shell Side			Tube Side		
10	Fluid name				5			14		
11	Fluid quantity, Total				15,53			122,1672		
12	Vapor (In/Out)				kg/s 15,53		0		0 0	
13	Liquid				kg/s 0		15,53		122,1672 122,1672	
14	Noncondensable				kg/s 0		0		0 0	
15										
16	Temperature (In/Out)				°C 64,64		39,87		25 30,18	
17	Bubble / Dew point				°C 40,61 / 44,52		40,35 / 44,18		/ /	
18	Density Vapor/Liquid				kg/m³ 22,97 /		/ 1377,65		/ 997,07 / 995,61	
19	Viscosity				mPa-s 0,0124 /		/ 0,3135		/ 0,89 / 0,7942	
20	Molecular wt, Vap				152,04					
21	Molecular wt, NC									
22	Specific heat				kJ/(kg-K) 0,94 /		/ 1,262		/ 4,181 / 4,179	
23	Thermal conductivity				W/(m-K) 0,0171 /		/ 0,0741		/ 0,6065 / 0,6147	
24	Latent heat				kJ/kg 145,5		145,7			
25	Pressure (abs)				bar 3,87428		3,83511		1,5 1,22692	
26	Velocity (Mean/Max)				m/s 1,03 / 2,35 1,46 / 1,48					
27	Pressure drop, allow./calc.				bar 0,5		0,03916		0,5 0,27308	
28	Fouling resistance (min)				m²-K/W 0,00018				0,00035 0,00045 Ao based	
29	Heat exchanged		2640,1		kW		MTD (corrected)		15,38 °C	
30	Transfer rate, Service		537,9		Dirty		537,9		Clean 813,2 W/(m²-K)	
31	CONSTRUCTION OF ONE SHELL									
32					Shell Side			Tube Side		
33	Design/Vacuum/test pressure				bar 4,82633 /		/ 3,44738 /		/ /	
34	Design temperature / MDMT				°C 104,44 /		/ 65,56 /			
35	Number passes per shell				1		2			
36	Corrosion allowance				mm 1,59 1,59					
37	Connections		In mm 2 254,51 /		-		1 254,51 /		-	
38	Size/Rating		Out mm 1 90,12 /		-		1 254,51 /		-	
39	ID		Intermediate /		-		/		-	
40	Tube #		975		OD: 19,05		Tks. Average 2,11		mm Length: 5700 mm Pitch: 23,81 mm Tube pattern:90	
41	Tube type: Plain		Insert:None		Fin#		#/m		Material:Carbon Steel	
42	Shell Carbon Steel		ID 939,8		OD 958,85		mm		Shell cover Carbon Steel	
43	Channel or bonnet Carbon Steel								Channel cover Carbon Steel	
44	Tubesheet-stationary Carbon Steel		Carbon Steel						Tubesheet-floating Carbon Steel	
45	Floating head cover Carbon Steel								Impingement protection None	
46	Baffle-cross Carbon Steel		Type Single segmental		Cut(%d) 39,86		VertiSpacing: c/c 666,75		mm	
47	Baffle-long -		Seal Type				Inlet 601,31		mm	
48	Supports-tube U-bend		0				Type			
49	Bypass seal				Tube-tubesheet joint		Expanded only (2 grooves)(App.A "i")			
50	Expansion joint -				Type None					
51	RhoV2-Inlet nozzle 1014		Bundle entrance 277		Bundle exit 9				kg/(m-s²)	
52	Gaskets - Shell side		Flat Metal J acket Fibe		Tube side		Flat Metal J acket Fibe			
53	Floating head		Flat Metal J acket Fibe							
54	Code requirements		ASME Code Sec VIII Div 1		TEMA class C - general service					
55	Weight/Shell		8798,4		Filled with water 13273,7		Bundle 5817,8		kg	
56	Remarks									
57										
58										



1.4 Ciclo transcrito sin aire de barrido

1.4.1 Intercambiador de agua de camisas

Aspen Exchanger Design and Rating Shell & Tube V12

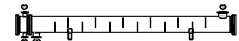
File: C:\Users\Usuario\Desktop\int super sin aire\Agua de camisas.EDR

Printed: 02/07/2021 at 5:43:12

TEMA Sheet

Heat Exchanger Specification Sheet

1	Company:									
2	Location:									
3	Service of Unit:					Our Reference:				
4	Item No.:					Your Reference:				
5	Date:	Rev No.:	Job No.:							
6	Size:	432 - 5486,4	mm	Type:	AEN Horizontal	Connected in:	1 parallel	1 series		
7	Surf/unit(eff.)	66,5	m²	Shells/unit	1	Surf/shell(eff.)	66,5	m²		
8	PERFORMANCE OF ONE UNIT									
9	Fluid allocation			Shell Side			Tube Side			
10	Fluid name			7			2			
11	Fluid quantity, Total			kg/s			33,1			
12	Vapor (In/Out)			kg/s			0 0 0 0			
13	Liquid			kg/s			33,1 33,1 13,736 13,736			
14	Noncondensable			kg/s			0 0 0 0			
15										
16	Temperature (In/Out)			°C			85 79,54 42,91 80,02			
17	Bubble / Dew point			°C			/ / / /			
18	Density Vapor/Liquid			kg/m³			/ 968,7 / 972,16 / 1125,12 / 976,52			
19	Viscosity			mPa-s			/ 0,3331 / 0,3561 / 0,1653 / 0,1059			
20	Molecular wt, Vap									
21	Molecular wt, NC									
22	Specific heat			kJ/(kg-K)			/ 4,2 / 4,195 / 1,406 / 1,601			
23	Thermal conductivity			W/(m-K)			/ 0,6702 / 0,6668 / 0,0713 / 0,0601			
24	Latent heat			kJ/kg						
25	Pressure (abs)			bar			3 2,81958 44,5 44,11006			
26	Velocity (Mean/Max)			m/s			0,55 / 0,63 1,48 / 1,72			
27	Pressure drop, allow./calc.			bar			0,5 0,18042 0,5 0,38994			
28	Fouling resistance (min)			m²-K/W			0,00018 0,00018 0,00023 Ao based			
29	Heat exchanged			kW			MTD (corrected)			12,13 °C
30	Transfer rate, Service			941,6 Dirty			942 Clean			1516,1 W/(m²-K)
31	CONSTRUCTION OF ONE SHELL									
32				Shell Side			Tube Side			
33	Design/Vacuum/test pressure			bar			3,44738 / / 48,9528 / /			
34	Design temperature / MDMT			°C			121,11 / / 115,56 / /			
35	Number passes per shell						1 4			
36	Corrosion allowance			mm			1,59 1,59			
37	Connections			mm			In 1 202,72 / - 1 77,93 / -			
38	Size/Rating			mm			Out 1 154,05 / - 1 90,12 / -			
39	ID			Intermediate			/ - / -			
40	Tube # 206 OD: 19,05 Tks. Average 2,11 mm Length: 5486,4 mm Pitch: 23,81 mm Tube pattern:30									
41	Tube type: Plain Insert:None Fin# #m Material:Carbon Steel									
42	Shell Carbon Steel			ID 438,15 OD 457,2 mm			Shell cover -			
43	Channel or bonnet Carbon Steel						Channel cover Carbon Steel			
44	Tubesheet-stationary Carbon Steel						Tubesheet-floating -			
45	Floating head cover -						Impingement protection None			
46	Baffle-cross Carbon Steel			Type Single segmental Cut(%d)			38,05 Horiz spacing: c/c 374,65 mm			
47	Baffle-long -			Seal Type			Inlet 635 mm			
48	Supports-tube U-bend			0			Type			
49	Bypass seal			Tube-tubesheet joint			Expanded only (2 grooves)(App.A "i")			
50	Expansion joint -			Type None						
51	RhoV2-Inlet nozzle 1086			Bundle entrance 391			Bundle exit 543 kg/(m-s²)			
52	Gaskets - Shell side -			Tube side			Flat Metal Jacket Fibe			
53	Floating head -									
54	Code requirements			ASME Code Sec VIII Div 1			TEMA class C - general service			
55	Weight/Shell			2433,2 Filled with water 3195,2			Bundle 1165,2 kg			
56	Remarks									
57										
58										



1.4.2 Intercambiador de Therminol 55

Aspen Exchanger Design and Rating Shell & Tube V12

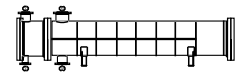
File: C:\Users\Usuario\Desktop\int super sin aire\Therminol 55.EDR

Printed: 02/07/2021 at 5:44:28

TEMA Sheet

Heat Exchanger Specification Sheet

1	Company:														
2	Location:														
3	Service of Unit:					Our Reference:									
4	Item No.:					Your Reference:									
5	Date:			Rev No.:			Job No.:								
6	Size:	610 - 3100	mm	Type:	AFN	Horizontal	Connected in:			1 parallel 1 series					
7	Surf/unit(eff.)	82	m²	Shells/unit	1	Surf/shell(eff.)	82	m²							
8	PERFORMANCE OF ONE UNIT														
9	Fluid allocation					Shell Side			Tube Side						
10	Fluid name					9			3						
11	Fluid quantity, Total					25,6933			13,74						
12	Vapor (In/Out)					0		0		13,74					
13	Liquid					25,6933		13,74		0					
14	Noncondensable					0		0		0					
15															
16	Temperature (In/Out)					175		140,11		80 140,11					
17	Bubble / Dew point					/		/		108,5 / 118 108,49 / 118,01					
18	Density Vapor/Liquid					/ 765,94		/ 790,32		/ 976,44 248,43 /					
19	Viscosity					/ 0,9675		/ 1,4546		/ 0,1059 0,0217 /					
20	Molecular wt, Vap										114,04				
21	Molecular wt, NC														
22	Specific heat					/ 2,457		/ 2,334		/ 1,601 1,819 /					
23	Thermal conductivity					/ 0,1104		/ 0,1145		/ 0,0601 0,0332 /					
24	Latent heat										20,9 20,9				
25	Pressure (abs)					1,5		1,18333		44 43,86539					
26	Velocity (Mean/Max)					0,79 / 0,94			1,13 / 2,78						
27	Pressure drop, allow./calc.					0,5		0,31667		0,5 0,13461					
28	Fouling resistance (min)					0,00018			0,00018 0,00023 Ao based						
29	Heat exchanged					2147,5		kW		MTD (corrected) 42,46 °C					
30	Transfer rate, Service					616,7		Dirty 616,5		Clean 819,7 W/(m²-K)					
31	CONSTRUCTION OF ONE SHELL					Sketch									
32						Shell Side			Tube Side						
33	Design/Vacuum/test pressure					bar 3,44738 / /		48,9528 / /							
34	Design temperature / MDMT					°C 210 /		176,67 /							
35	Number passes per shell					2 4									
36	Corrosion allowance					mm 1,59 1,59									
37	Connections					In mm 1 202,72 / -		1 90,12 / -							
38	Size/Rating					Out 1 154,05 / -		1 154,05 / -							
39	ID					Intermediate / - / -									
40	Tube #	460	OD:	19,05	Tks. Average	2,11	mm	Length:	3100	mm	Pitch:	23,81	mm	Tube pattern:	30
41	Tube type: Plain					Insert:None					Fin# #/m Material:Carbon Steel				
42	Shell Carbon Steel					ID 609,6 OD 625,48					mm Shell cover -				
43	Channel or bonnet Carbon Steel										Channel cover Carbon Steel				
44	Tubesheet-stationary Carbon Steel					-					Tubesheet-floating -				
45	Floating head cover -										Impingement protection None				
46	Baffle-cross Carbon Steel					Type Single segmental Cut(%d) 40,63					VertiSpacing: c/c 342,9 mm				
47	Baffle-long Carbon Steel					Seal Type					Inlet 434,98 mm				
48	Supports-tube U-bend					0					Type				
49	Bypass seal					Tube-tubesheet joint					Expanded only (2 grooves)(App.A 'i')				
50	Expansion joint -					Type None									
51	RhoV2-Inlet nozzle 827					Bundle entrance 379					Bundle exit 666 kg/(m-s²)				
52	Gaskets - Shell side -					Tube side					Flat Metal J acket Fibe				
53	Floating head -														
54	Code requirements					ASME Code Sec VIII Div 1					TEMA class C - general service				
55	Weight/Shell					3594,3		Filled with water 4541		Bundle 1632,4		kg			
56	Remarks														
57															
58															



1.4.3 Condensador

Aspen Exchanger Design and Rating Shell & Tube V12

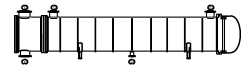
File: C:\Users\Usuario\Desktop\int super sin aire\Condensador.EDR

Printed: 02/07/2021 at 5:45:15

TEMA Sheet

Heat Exchanger Specification Sheet

1	Company:									
2	Location:									
3	Service of Unit:					Our Reference:				
4	Item No.:					Your Reference:				
5	Date:		Rev No.:			Job No.:				
6	Size: 1016 - 5250		mm		Type: AIS		Horizontal		Connected in: 1 parallel 1 series	
7	Surf/unit(eff.)		351,7		m²		Shells/unit 1		Surf/shell(eff.) 351,7 m²	
8	PERFORMANCE OF ONE UNIT									
9	Fluid allocation					Shell Side			Tube Side	
10	Fluid name					5			11	
11	Fluid quantity, Total					13,74			129,1377	
12	Vapor (In/Out)					kg/s		13,74		0,0029
13	Liquid					kg/s		0		13,7371
14	Noncondensable					kg/s		129,1377		129,1377
15						kg/s		0		0
16	Temperature (In/Out)					°C		73,54		37,87
17	Bubble / Dew point					°C		38,01 / 42,34		37,87 / 42,15
18	Density Vapor/Liquid					kg/m³		36,81 /		44,29 / 1119,78
19	Viscosity					mPa-s		0,0149 /		0,0131 / 0,1625
20	Molecular wt, Vap							114,04		114,04
21	Molecular wt, NC									
22	Specific heat					kJ/(kg-K)		1,042 /		1,07 / 1,432
23	Thermal conductivity					W/(m-K)		0,0179 /		0,0148 / 0,07
24	Latent heat					kJ/kg		153,6		153,8
25	Pressure (abs)					bar		8,1645		8,1235
26	Velocity (Mean/Max)					m/s		0,75 / 1,85		1,27 / 1,28
27	Pressure drop, allow./calc.					bar		0,5		0,041
28	Fouling resistance (min)					m²-K/W		0,00018		0,00035 0,00045 Ao based
29	Heat exchanged		2636,4		kW		MTD (corrected)		13,68 °C	
30	Transfer rate, Service		548,1		Dirty		548,8		Clean 837,4 W/(m²-K)	
31	CONSTRUCTION OF ONE SHELL					Sketch				
32						Shell Side			Tube Side	
33	Design/Vacuum/test pressure					bar		9,65266 /		3,44738 /
34	Design temperature / MDMT					°C		110 /		65,56 /
35	Number passes per shell							1		2
36	Corrosion allowance					mm		1,59		1,59
37	Connections		In		mm		2 202,72 / -		1 254,51 / -	
38	Size/Rating		Out				1 90,12 / -		1 304,8 / -	
39	ID		Intermediate				/ -		/ -	
40	Tube # 1180		OD: 19,05		Tks. Average 2,11		mm		Length: 5250 mm Pitch: 23,81 mm Tube pattern: 90	
41	Tube type: Plain		Insert: None		Fin#		#/m		Material: Carbon Steel	
42	Shell Carbon Steel		ID 1016		OD 1038,22		mm		Shell cover Carbon Steel	
43	Channel or bonnet Carbon Steel								Channel cover Carbon Steel	
44	Tubesheet-stationary Carbon Steel								Tubesheet-floating Carbon Steel	
45	Floating head cover Carbon Steel								Impingement protection None	
46	Baffle-cross Carbon Steel		Type		Single segmental		Cut(%d) 34,77		VertiSpacing: c/c 508 mm	
47	Baffle-long -		Seal Type						Inlet 423,93 mm	
48	Supports-tube U-bend		0		Type					
49	Bypass seal		Tube-tubesheet joint		Expanded only (2 grooves)(App.A "i")					
50	Expansion joint -		Type		None					
51	RhoV2-Inlet nozzle 1231		Bundle entrance 393		Bundle exit 14				kg/(m-s²)	
52	Gaskets - Shell side		Flat Metal J acket Fibe		Tube side		Flat Metal J acket Fibe			
53	Floating head		Flat Metal J acket Fibe							
54	Code requirements		ASME Code Sec VIII Div 1		TEMA class		C - general service			
55	Weight/Shell		10208		Filled with water 15264		Bundle 6402,8		kg	
56	Remarks									
57										
58										



2 CÁLCULOS PARA EL ESTUDIO ECONÓMICO EN EES

2.1 Ciclo subcrítico con aire de barrido

- 1: "cálculos económicos para el WHRS subcrítico sin intercambiador de aire de barrido"
- 2:
- 3: "trabajo del motor auxiliar a un 50% de carga"
- 4: $W_{MAN_aux}=926,5$
- 5:
- 6: "trabajo neto realizado por WHRS"
- 7: $Wn_{R236ea}=544,04$
- 8:
- 9: "consumo del motor auxiliar al 50% de carga"
- 10: $B_{vlsfo}=198,1/10^6$
- 11: $B_{mdo}=186,5/10^6$
- 12:
- 13: "horas de utilización al año"
- 14: $hr_{oc_an}=7200$
- 15:
- 16: "índices CEPCI"
- 17: $CEPCI_{mar2019}=616$
- 18: $CEPCI_{feb2021}=637,8$
- 19:
- 20: "coste del combustible por tonelada"
- 21: $Cost_{med_VLSFO}=402,25$
- 22: $Cost_{med_MDO}=490,22$
- 23:
- 24: "Consumo anual de combustible"
- 25: $Cons_{an_VLSFO}=W_{MAN_aux}*B_{vlsfo}*hr_{oc_an}$
- 26: $Cons_{an_MDO}=W_{MAN_aux}*B_{mdo}*hr_{oc_an}$
- 27:
- 28: "Ahorro de consumo anual"
- 29: $Ahorr_{mas_an_sub_VLSFO}=Wn_{R236ea}*B_{vlsfo}*hr_{oc_an}$
- 30: $Ahorr_{mas_an_sub_MDO}=Wn_{R236ea}*B_{mdo}*hr_{oc_an}$
- 31:
- 32: "% ahorrado anual de consumo"
- 33: $Ahorro_{\%anu_VLSFO}=100*(Ahorr_{mas_an_sub_VLSFO}/Cons_{an_VLSFO})$
- 34: $Ahorro_{\%anu_MDO}=100*(Ahorr_{mas_an_sub_MDO}/Cons_{an_MDO})$
- 35:
- 36: "calculo ahorro anual de gastos en combustible"
- 37: $Ahorr_{an_VLSFO}=Ahorr_{mas_an_sub_VLSFO}*Cost_{VLSFO}$
- 38: $Ahorr_{an_med_VLSFO}=Ahorr_{mas_an_sub_VLSFO}*Cost_{med_VLSFO}$
- 39:
- 40: $Ahorr_{an_MDO}=Ahorr_{mas_an_sub_MDO}*Cost_{MDO}$
- 41: $Ahorr_{an_med_MDO}=Ahorr_{mas_an_sub_MDO}*Cost_{med_MDO}$
- 42:
- 43:
- 44: "cálculo del anual cash flow neto, ahorro en combustible menos el gasto"
- 45: $ACF_{VLSFO}=Ahorr_{an_VLSFO}-O\&M$
- 46: $ACF_{med_VLSFO}=Ahorr_{an_med_VLSFO}-O\&M$
- 47:

48: $ACF_{MDO} = Ahorr_{an,MDO} - O\&M$
 49: $ACF_{med,MDO} = Ahorr_{an,med,MDO} - O\&M$
 50:
 51:
 52: "Cálculos de costes directos fijos y variables, indirectos y coste total"
 53: $PEC = 781110,00$
 54: $INS = 0,45 * PEC$
 55: $CON = 0,66 * PEC$
 56: $ISC = 0,2 * PEC$
 57: $MEL = 0,11 * PEC$
 58: $DFCI = PEC + INS + CON + ISC + MEL$
 59: $EGS = 0,3 * PEC$
 60: $COC = 0,15 * DFCI$
 61: $CNT = 0,1 * DFCI$
 62: $CL = 0,02 * DFCI$
 63: $IFCI = EGS + COC + CNT + CL$
 64: $SU = 0,1 * DFCI$
 65: $TFCI = DFCI + IFCI$
 66: $TCI_{mar2019} = DFCI + FCI + SU$
 67: $O\&M = 0,02 * TCI_{feb2021}$
 68:
 69: "aplicación de los índices CEPCI"
 70: $TCI_{feb2021} = TCI_{mar2019} * (CEPCI_{feb2021} / CEPCI_{mar2019})$
 71:
 72: "cálculo del payback period para el ciclo subcrítico"
 73: $PBP_{VLSFO} = TCI_{feb2021} / ACF_{VLSFO}$
 74: $PBP_{med,VLSFO} = TCI_{feb2021} / ACF_{med,VLSFO}$
 75:
 76: $PBP_{MDO} = TCI_{feb2021} / ACF_{MDO}$
 77: $PBP_{med,MDO} = TCI_{feb2021} / ACF_{med,MDO}$

SOLUTION

Unit Settings: SI C bar kj mass deg

(Table 1, Run 25)

$$ACF_{MDO} = 193965 \text{ [€/ yr]}$$

$$ACF_{med,VLSFO} = 253657 \text{ [€/ yr]}$$

$$Ahorr_{\%anu,MDO} = 58,72$$

$$Ahorr_{an,MDO} = 252444 \text{ [€/ yr]}$$

$$Ahorr_{an,med,VLSFO} = 312136 \text{ [€/ yr]}$$

$$Ahorr_{mas,an,sub,MDO} = 730,5 \text{ [T/ yr]}$$

$$B_{mdo} = 0,0001865 \text{ [T/ (kW·hr)]}$$

$$CEPCI_{feb2021} = 637,8$$

$$CL = 37806 \text{ [€]}$$

$$COC = 283543 \text{ [€]}$$

$$Cons_{an,MDO} = 1244 \text{ [T/ yr]}$$

$$Cost_{MDO} = 345,6 \text{ [€/ T]}$$

$$ACF_{med,MDO} = 299644 \text{ [€/ yr]}$$

$$ACF_{VLSFO} = 120003 \text{ [€/ yr]}$$

$$Ahorr_{\%anu,VLSFO} = 58,72$$

$$Ahorr_{an,med,MDO} = 358124 \text{ [€/ yr]}$$

$$Ahorr_{an,VLSFO} = 178482 \text{ [€/ yr]}$$

$$Ahorr_{mas,an,sub,VLSFO} = 776 \text{ [T/ yr]}$$

$$B_{vlsfo} = 0,0001981 \text{ [T/ (kW·hr)]}$$

$$CEPCI_{mar2019} = 616$$

$$CNT = 189029 \text{ [€]}$$

$$CON = 515533 \text{ [€]}$$

$$Cons_{an,VLSFO} = 1321 \text{ [T/ yr]}$$

$$Cost_{med,MDO} = 490,2 \text{ [€/ T]}$$

Cost _{med,VLSFO} = 402,3 [€/ T]	Cost _{VLSFO} = 230 [€/ T]
DFCI = 1,890E+06 [€]	EGS = 234333 [€]
hr _{oc,an} = 7200 [hr/ yr]	IFCI = 744710 [€]
INS = 351500 [€]	ISC = 156222 [€]
MEL = 85922 [€]	O&M = 58479 [€/ yr]
PBP _{MDO} = 15,07 [yr]	PBP _{med,MDO} = 9,758 [yr]
PBP _{med,VLSFO} = 11,53 [yr]	PBP _{VLSFO} = 24,37 [yr]
PEC = 781110 [€]	SU = 189029 [€]
TCI _{feb2021} = 2923966,24 [€]	TCI _{mar2019} = 2824025,09 [€]
TFCI = 2,635E+06	Wn _{R236ea} = 544 [kW]
W _{MAN,aux} = 926,5 [kW]	

No unit problems were detected.

Parametric Table: Table 1

	Cost _{VLSFO} [€/T]	Cost _{MDO} [€/T]	PBP _{MDO} [yr]	PBP _{VLSFO} [yr]
Run 1	599,9	639,9	7,149	7,184
Run 2	584,5	627,7	7,309	7,402
Run 3	569	615,4	7,477	7,633
Run 4	553,6	603,1	7,652	7,879
Run 5	538,2	590,9	7,836	8,141
Run 6	522,8	578,6	8,028	8,421
Run 7	507,4	566,3	8,231	8,722
Run 8	492	554,1	8,444	9,044
Run 9	476,6	541,8	8,668	9,392
Run 10	461,2	529,5	8,905	9,767
Run 11	445,8	517,3	9,154	10,17
Run 12	430,4	505	9,419	10,61
Run 13	414,9	492,7	9,699	11,1
Run 14	399,5	480,5	9,996	11,62
Run 15	384,1	468,2	10,31	12,2
Run 16	368,7	455,9	10,65	12,85
Run 17	353,3	443,7	11,01	13,56
Run 18	337,9	431,4	11,39	14,35
Run 19	322,5	419,2	11,8	15,25
Run 20	307,1	406,9	12,25	16,26
Run 21	291,7	394,6	12,72	17,42
Run 22	276,2	382,4	13,24	18,76
Run 23	260,8	370,1	13,8	20,32
Run 24	245,4	357,8	14,41	22,16
Run 25	230	345,6	15,07	24,37

2.2 Ciclo transcrito con aire de barrido

- 1: "cálculos económicos para el WHRS transcrito con intercambiador de aire de barrido"
- 2:
- 3: "trabajo del motor auxiliar a un 50% de carga"
- 4: $W_{MAN_aux}=926,5$
- 5:
- 6: "trabajo neto realizado por WHRS"
- 7: $Wn_{R1234zeE}=747,40$
- 8:
- 9: "consumo del motor auxiliar al 50% de carga"
- 10: $B_{vlsfo}=198,1/10^6$
- 11: $B_{mdo}=186,5/10^6$
- 12:
- 13: "horas de utilización al año"
- 14: $hr_{oc_an}=7200$
- 15:
- 16: "índices CEPCI"
- 17: $CEPCI_{mar2019}=616$
- 18: $CEPCI_{feb2021}=637,8$
- 19:
- 20: "coste del combustible por tonelada"
- 21: $Cost_{med_VLSFO}=402,25$
- 22: $Cost_{med_MDO}=490,22$
- 23:
- 24: "Consumo anual de combustible"
- 25: $Cons_{an_VLSFO}=W_{MAN_aux}*B_{vlsfo}*hr_{oc_an}$
- 26: $Cons_{an_MDO}=W_{MAN_aux}*B_{mdo}*hr_{oc_an}$
- 27:
- 28: "Ahorro de consumo anual"
- 29: $Ahorr_{mas_an_sub_VLSFO}=Wn_{R1234zeE}*B_{vlsfo}*hr_{oc_an}$
- 30: $Ahorr_{mas_an_sub_MDO}=Wn_{R1234zeE}*B_{mdo}*hr_{oc_an}$
- 31:
- 32: "% ahorrado anual de consumo"
- 33: $Ahorro_{\%anu_VLSFO}=100*(Ahorr_{mas_an_sub_VLSFO}/Cons_{an_VLSFO})$
- 34: $Ahorro_{\%anu_MDO}=100*(Ahorr_{mas_an_sub_MDO}/Cons_{an_MDO})$
- 35:
- 36: "calculo ahorro anual de gastos en combustible"
- 37: $Ahorr_{an_VLSFO}=Ahorr_{mas_an_sub_VLSFO}*Cost_{VLSFO}$
- 38: $Ahorr_{an_med_VLSFO}=Ahorr_{mas_an_sub_VLSFO}*Cost_{med_VLSFO}$
- 39:
- 40: $Ahorr_{an_MDO}=Ahorr_{mas_an_sub_MDO}*Cost_{MDO}$
- 41: $Ahorr_{an_med_MDO}=Ahorr_{mas_an_sub_MDO}*Cost_{med_MDO}$
- 42:
- 43:
- 44: "cálculo del anual cash flow neto, ahorro en combustible menos el gasto"
- 45: $ACF_{VLSFO}=Ahorr_{an_VLSFO}-O\&M$
- 46: $ACF_{med_VLSFO}=Ahorr_{an_med_VLSFO}-O\&M$
- 47:

48: $ACF_{MDO} = Ahorr_{an_MDO} - O\&M$
 49: $ACF_{med_MDO} = Ahorr_{an_med_MDO} - O\&M$
 50:
 51:
 52: "Cálculos de costes fijos y variables"
 53: $PEC = 1187700,00$
 54: $INS = 0,45 * PEC$
 55: $CON = 0,66 * PEC$
 56: $ISC = 0,2 * PEC$
 57: $MEL = 0,11 * PEC$
 58: $DFCI = PEC + INS + CON + ISC + MEL$
 59: $EGS = 0,3 * PEC$
 60: $COC = 0,15 * DFCI$
 61: $CNT = 0,1 * DFCI$
 62: $CL = 0,02 * DFCI$
 63: $IFCI = EGS + COC + CNT + CL$
 64: $TFCI = DFCI + IFCI$
 65: $SU = 0,1 * DFCI$
 66: $OTR = SU$
 67: $TCI_{mar2019} = TFCI + OTR$
 68: $O\&M = 0,02 * TCI_{feb2021}$
 69:
 70: "aplicación de los índices CEPCI"
 71: $TCI_{feb2021} = TCI_{mar2019} * (CEPCI_{feb2021} / CEPCI_{mar2019})$
 72:
 73: "cálculo del payback period para el ciclo subcrítico"
 74: $PBP_{VLSFO} = TCI_{feb2021} / ACF_{VLSFO}$
 75: $PBP_{med_VLSFO} = TCI_{feb2021} / ACF_{med_VLSFO}$
 76:
 77: $PBP_{MDO} = TCI_{feb2021} / ACF_{MDO}$
 78: $PBP_{med_MDO} = TCI_{feb2021} / ACF_{med_MDO}$

SOLUTION

Unit Settings: SI C bar kj mass deg

(Table 1, Run 25)

$ACF_{MDO} = 257888$ [€/ yr]	$ACF_{med,MDO} = 403070$ [€/ yr]
$ACF_{med,VLSFO} = 339892$ [€/ yr]	$ACF_{VLSFO} = 156278$ [€/ yr]
$Ahorro\%_{anu,MDO} = 80,67$ [%]	$Ahorro\%_{anu,VLSFO} = 80,67$ [%]
$Ahorr_{an,MDO} = 346807$ [€/ yr]	$Ahorr_{an,med,MDO} = 491989$ [€/ yr]
$Ahorr_{an,med,VLSFO} = 428811$ [€/ yr]	$Ahorr_{an,VLSFO} = 245198$ [€/ yr]
$Ahorr_{mas,an,sub,MDO} = 1004$ [T/ yr]	$Ahorr_{mas,an,sub,VLSFO} = 1066$ [T/ yr]
$B_{mdo} = 0,0001865$ [T/ (kW·hr)]	$B_{vlsfo} = 0,0001981$ [T/ (kW·hr)]
$CEPCI_{feb2021} = 637,8$	$CEPCI_{mar2019} = 616$
$CL = 57485$ [€]	$CNT = 287423$ [€]
$COC = 431135$ [€]	$CON = 783882$ [€]
$ConSan_{MDO} = 1244$ [T/ yr]	$ConSan_{VLSFO} = 1321$ [T/ yr]

$Cost_{MDO} = 345,6$ [€/ yr]	$Cost_{med,MDO} = 490,2$ [€/ yr]
$Cost_{med,VLSFO} = 402,3$ [€/ yr]	$Cost_{VLSFO} = 230$ [€/ yr]
$DFCI = 2,874E+06$ [€]	$EGS = 356310$ [€]
$h_{Foc,an} = 7200$ [hr/ yr]	$IFCI = 1,132E+06$ [€]
$INS = 534465$ [€]	$ISC = 237540$ [€]
$MEL = 130647$ [€]	$O\&M = 88919$ [€/ yr]
$OTR = 287423$ [€]	$PBP_{MDO} = 17,24$ [yr]
$PBP_{med,MDO} = 11,03$ [yr]	$PBP_{med,VLSFO} = 13,08$ [yr]
$PBP_{VLSFO} = 28,45$ [yr]	$PEC = 1,188E+06$ [€]
$SU = 287423$ [€]	$TCl_{feb2021} = 4445973,94$ [€]
$TCl_{mar2019} = 4294010,58$ [€]	$TFCI = 4,007E+06$ [€]
$Wn_{R1234zeE} = 747,4$ [kW]	$W_{MAN,aux} = 926,5$ [kW]

No unit problems were detected.

Parametric Table: Table 1

	$Cost_{VLSFO}$ [€/yr]	$Cost_{MDO}$ [€/yr]	PBP_{MDO} [yr]	PBP_{VLSFO} [yr]
Run 1	599,9	639,9	8,035	8,075
Run 2	584,5	627,7	8,218	8,324
Run 3	569	615,4	8,409	8,588
Run 4	553,6	603,1	8,61	8,869
Run 5	538,2	590,9	8,82	9,17
Run 6	522,8	578,6	9,041	9,491
Run 7	507,4	566,3	9,273	9,836
Run 8	492	554,1	9,517	10,21
Run 9	476,6	541,8	9,775	10,61
Run 10	461,2	529,5	10,05	11,04
Run 11	445,8	517,3	10,33	11,51
Run 12	430,4	505	10,64	12,02
Run 13	414,9	492,7	10,96	12,58
Run 14	399,5	480,5	11,3	13,19
Run 15	384,1	468,2	11,67	13,87
Run 16	368,7	455,9	12,06	14,62
Run 17	353,3	443,7	12,48	15,45
Run 18	337,9	431,4	12,92	16,39
Run 19	322,5	419,2	13,4	17,45
Run 20	307,1	406,9	13,92	18,65
Run 21	291,7	394,6	14,48	20,03
Run 22	276,2	382,4	15,08	21,63
Run 23	260,8	370,1	15,74	23,51
Run 24	245,4	357,8	16,45	25,74
Run 25	230	345,6	17,24	28,45

2.3 Ciclo subcrítico sin aire e barrido

- 1: "cálculos económicos para el WHRS subcrítico sin intercambiador de aire de barrido"
- 2:
- 3: "trabajo del motor auxiliar a un 50% de carga"
- 4: $W_{MAN_aux}=926,5$
- 5:
- 6: "trabajo neto realizado por WHRS"
- 7: $Wn_{R236ea}=297,68$
- 8:
- 9: "consumo del motor auxiliar al 50% de carga"
- 10: $B_{vlsfo}=198,1/10^6$
- 11: $B_{mdo}=186,5/10^6$
- 12:
- 13: "horas de utilización al año"
- 14: $hr_{oc_an}=7200$
- 15:
- 16: "índices CEPCI"
- 17: $CEPCI_{mar2019}=616$
- 18: $CEPCI_{feb2021}=637,8$
- 19:
- 20: "coste del combustible por tonelada"
- 21: $Cost_{med_VLSFO}=402,25$
- 22: $Cost_{med_MDO}=490,22$
- 23:
- 24: "Consumo anual de combustible"
- 25: $Cons_{an_VLSFO}=W_{MAN_aux}*B_{vlsfo}*hr_{oc_an}$
- 26: $Cons_{an_MDO}=W_{MAN_aux}*B_{mdo}*hr_{oc_an}$
- 27:
- 28: "Ahorro de consumo anual"
- 29: $Ahorr_{mas_an_sub_VLSFO}=Wn_{R236ea}*B_{vlsfo}*hr_{oc_an}$
- 30: $Ahorr_{mas_an_sub_MDO}=Wn_{R236ea}*B_{mdo}*hr_{oc_an}$
- 31:
- 32: "% ahorrado anual de consumo"
- 33: $Ahorro_{\%anu_VLSFO}=100*(Ahorr_{mas_an_sub_VLSFO}/Cons_{an_VLSFO})$
- 34: $Ahorro_{\%anu_MDO}=100*(Ahorr_{mas_an_sub_MDO}/Cons_{an_MDO})$
- 35:
- 36: "calculo ahorro anual de gastos en combustible"
- 37: $Ahorr_{an_VLSFO}=Ahorr_{mas_an_sub_VLSFO}*Cost_{VLSFO}$
- 38: $Ahorr_{an_med_VLSFO}=Ahorr_{mas_an_sub_VLSFO}*Cost_{med_VLSFO}$
- 39:
- 40: $Ahorr_{an_MDO}=Ahorr_{mas_an_sub_MDO}*Cost_{MDO}$
- 41: $Ahorr_{an_med_MDO}=Ahorr_{mas_an_sub_MDO}*Cost_{med_MDO}$
- 42:
- 43:
- 44: "cálculo del anual cash flow neto, ahorro en combustible menos el gasto"
- 45: $ACF_{VLSFO}=Ahorr_{an_VLSFO}-O\&M$
- 46: $ACF_{med_VLSFO}=Ahorr_{an_med_VLSFO}-O\&M$
- 47:

48: $ACF_MDO = Ahorr_an_MDO - O\&M$
 49: $ACF_med_MDO = Ahorr_an_med_MDO - O\&M$
 50:
 51:
 52: "Cálculos de costes fijos y variables"
 53: $PEC = 481100,00$
 54: $INS = 0,45 * PEC$
 55: $CON = 0,66 * PEC$
 56: $ISC = 0,2 * PEC$
 57: $MEL = 0,11 * PEC$
 58: $DFCI = PEC + INS + CON + HSC + MEL$
 59: $EGS = 0,3 * PEC$
 60: $COC = 0,15 * DFCI$
 61: $CNT = 0,1 * DFCI$
 62: $CL = 0,02 * DFCI$
 63: $IFCI = EGS + COC + CNT + CL$
 64: $SU = 0,1 * DFCI$
 65: $TFCI = DFCI + IFCI$
 66: $TCI_mar2019 = DFCI + IFCI + SU$
 67: $O\&M = 0,02 * TCI_feb2021$
 68:
 69: "aplicación de los índices CEPCI"
 70: $TCI_feb2021 = TCI_mar2019 * (CEPCI_feb2021 / CEPCI_mar2019)$
 71: $Cost_unit = TCI_feb2021 / Wn_R236ea$
 72:
 73: "cálculo del payback period para el ciclo subcrítico"
 74: $PBP_VLSFO = TCI_feb2021 / ACF_VLSFO$
 75: $PBP_med_VLSFO = TCI_feb2021 / ACF_med_VLSFO$
 76:
 77: $PBP_MDO = TCI_feb2021 / ACF_MDO$
 78: $PBP_med_MDO = TCI_feb2021 / ACF_med_MDO$

SOLUTION

Unit Settings: SI C bar kj mass deg

(Table 1, Run 25)

$ACF_{MDO} = 102110$ [€/ yr]	$ACF_{med,MDO} = 159935$ [€/ yr]
$ACF_{med,VLSFO} = 134772$ [€/ yr]	$ACF_{VLSFO} = 61641$ [€/ yr]
$Ahorro\%anu,MDO = 32,130$ [%]	$Ahorro\%anu,VLSFO = 32,130$ [%]
$Ahorran,MDO = 138129$ [€/ yr]	$Ahorran,med,MDO = 195953$ [€/ yr]
$Ahorran,med,VLSFO = 170790$ [€/ yr]	$Ahorran,VLSFO = 97659$ [€/ yr]
$Ahorrmass,an,sub,MDO = 399,7$ [T/ yr]	$Ahorrmass,an,sub,VLSFO = 424,6$ [T/ yr]
$B_{mdo} = 0,0001865$ [T/ (kW·hr)]	$B_{visfo} = 0,0001981$ [T/ (kW·hr)]
$CEPCI_{feb2021} = 637,8$	$CEPCI_{mar2019} = 616$
$CL = 23285$ [€]	$CNT = 116426$ [€]
$COC = 174639$ [€]	$CON = 317526$ [€]
$Consan,MDO = 1244$ [T/ yr]	$Consan,VLSFO = 1321$ [T/ yr]
$Cost_{MDO} = 345,6$ [€/ T]	$Cost_{med,MDO} = 490,2$ [€/ T]
$Cost_{med,VLSFO} = 402,3$ [€/ T]	$Cost_{unit} = 6050$ [€/ kW]
$Cost_{VLSFO} = 230$ [€/ T]	$DFCI = 1,164E+06$ [€]
$EGS = 144330$ [€]	$h_{roc,an} = 7200$ [hr/ yr]
$IFCI = 458681$ [€]	$INS = 216495$ [€]
$ISC = 96220$ [€]	$MEL = 52921$ [€]
$O\&M = 36018$ [€/ yr]	$PBP_{MDO} = 17,64$ [yr]
$PBP_{med,MDO} = 11,26$ [yr]	$PBP_{med,VLSFO} = 13,36$ [yr]

$PBP_{VLSFO} = 29,22$ [yr]
 $SU = 116426$ [€]
 $TCl_{mar2019} = 1739368,94$ [€]
 $Wn_{R236ea} = 297,7$ [kW]

$PEC = 481100$ [€]
 $TCl_{feb2021} = 1800924,53$ [€]
 $TFCI = 1,623E+06$ [€]
 $W_{MAN,aux} = 926,5$ [kW]

No unit problems were detected.

Parametric Table: Table 1

	$Cost_{VLSFO}$ [€/T]	$Cost_{MDO}$ [€/T]	PBP_{MDO} [yr]	PBP_{VLSFO} [yr]
Run 1	599,9	639,9	8,194	8,235
Run 2	584,5	627,7	8,381	8,49
Run 3	569	615,4	8,577	8,76
Run 4	553,6	603,1	8,782	9,048
Run 5	538,2	590,9	8,997	9,355
Run 6	522,8	578,6	9,223	9,684
Run 7	507,4	566,3	9,461	10,04
Run 8	492	554,1	9,711	10,42
Run 9	476,6	541,8	9,975	10,83
Run 10	461,2	529,5	10,25	11,27
Run 11	445,8	517,3	10,55	11,75
Run 12	430,4	505	10,86	12,28
Run 13	414,9	492,7	11,19	12,85
Run 14	399,5	480,5	11,54	13,48
Run 15	384,1	468,2	11,92	14,17
Run 16	368,7	455,9	12,32	14,94
Run 17	353,3	443,7	12,74	15,8
Run 18	337,9	431,4	13,2	16,76
Run 19	322,5	419,2	13,69	17,85
Run 20	307,1	406,9	14,22	19,09
Run 21	291,7	394,6	14,8	20,51
Run 22	276,2	382,4	15,42	22,16
Run 23	260,8	370,1	16,09	24,1
Run 24	245,4	357,8	16,83	26,41
Run 25	230	345,6	17,64	29,22

2.4 Ciclo transcrito sin aire de barrido

- 1: "cálculos económicos para el WHRS transcrito sin intercambiador de aire de barrido"
- 2:
- 3: "trabajo del motor auxiliar a un 50% de carga"
- 4: $W_{MAN_aux}=926,5$
- 5:
- 6: "trabajo neto realizado por WHRS"
- 7: $W_{n_R1234zeE}=284,84$
- 8:
- 9: "consumo del motor auxiliar al 50% de carga"
- 10: $B_{vlsfo}=198,1/10^6$
- 11: $B_{mdo}=186,5/10^6$
- 12:
- 13: "horas de utilización al año"
- 14: $hr_{oc_an}=7200$
- 15:
- 16: "índices CEPCI"
- 17: $CEPCI_{mar2019}=616$
- 18: $CEPCI_{feb2021}=637,8$
- 19:
- 20: "coste del combustible por tonelada"
- 21: $Cost_{med_VLSFO}=402,25$
- 22: $Cost_{med_MDO}=490,22$
- 23:
- 24: "Consumo anual de combustible"
- 25: $Cons_{an_VLSFO}=W_{MAN_aux}*B_{vlsfo}*hr_{oc_an}$
- 26: $Cons_{an_MDO}=W_{MAN_aux}*B_{mdo}*hr_{oc_an}$
- 27:
- 28: "Ahorro de consumo anual"
- 29: $Ahorr_{mas_an_sub_VLSFO}=W_{n_R1234zeE}*B_{vlsfo}*hr_{oc_an}$
- 30: $Ahorr_{mas_an_sub_MDO}=W_{n_R1234zeE}*B_{mdo}*hr_{oc_an}$
- 31:
- 32: "% ahorrado anual de consumo"
- 33: $Ahorro_{\%anu_VLSFO}=100*(Ahorr_{mas_an_sub_VLSFO}/Cons_{an_VLSFO})$
- 34: $Ahorro_{\%anu_MDO}=100*(Ahorr_{mas_an_sub_MDO}/Cons_{an_MDO})$
- 35:
- 36: "calculo ahorro anual de gastos en combustible"
- 37: $Ahorr_{an_VLSFO}=Ahorr_{mas_an_sub_VLSFO}*Cost_{VLSFO}$
- 38: $Ahorr_{an_med_VLSFO}=Ahorr_{mas_an_sub_VLSFO}*Cost_{med_VLSFO}$
- 39:
- 40: $Ahorr_{an_MDO}=Ahorr_{mas_an_sub_MDO}*Cost_{MDO}$
- 41: $Ahorr_{an_med_MDO}=Ahorr_{mas_an_sub_MDO}*Cost_{med_MDO}$
- 42:
- 43:
- 44: "cálculo del anual cash flow neto, ahorro en combustible menos el gasto"
- 45: $ACF_{VLSFO}=Ahorr_{an_VLSFO}-O\&M$
- 46: $ACF_{med_VLSFO}=Ahorr_{an_med_VLSFO}-O\&M$
- 47:

48: $ACF_{MDO} = Ahorr_{an_MDO} - O\&M$
 49: $ACF_{med_MDO} = Ahorr_{an_med_MDO} - O\&M$
 50:
 51:
 52: "Cálculos de costes fijos y variables"
 53: $PEC = 556500,0$
 54: $INS = 0,45 * PEC$
 55: $CON = 0,66 * PEC$
 56: $ISC = 0,2 * PEC$
 57: $MEL = 0,11 * PEC$
 58: $DFCI = PEC + INS + CON + ISC + MEL$
 59: $EGS = 0,3 * PEC$
 60: $COC = 0,15 * DFCI$
 61: $CNT = 0,1 * DFCI$
 62: $CL = 0,02 * DFCI$
 63: $IFCI = EGS + COC + CNT + CL$
 64: $SU = 0,1 * DFCI$
 65: $TFCI = IFCI + DFCI$
 66: $TCI_{mar2019} = DFCI + FCI + SU$
 67: $O\&M = 0,02 * TCI_{feb2021}$
 68: $Cost_{unit} = TCI_{feb2021} / Wn_{R1234zeE}$
 69:
 70: "aplicación de los índices CEPCI"
 71: $TCI_{feb2021} = TCI_{mar2019} * (CEPCI_{feb2021} / CEPCI_{mar2019})$
 72:
 73: "cálculo del payback period para el ciclo subcrítico"
 74: $PBP_{VLSFO} = TCI_{feb2021} / ACF_{VLSFO}$
 75: $PBP_{med_VLSFO} = TCI_{feb2021} / ACF_{med_VLSFO}$
 76:
 77: $PBP_{MDO} = TCI_{feb2021} / ACF_{MDO}$
 78: $PBP_{med_MDO} = TCI_{feb2021} / ACF_{med_MDO}$

SOLUTION

Unit Settings: SI C bar kj mass deg

(Table 1, Run 25)

 $ACF_{MDO} = 90507$ $ACF_{med,VLSFO} = 121760 \text{ [€/ yr]}$ $Ahorro\%_{anu,MDO} = 30,74$ $Ahorr_{an,MDO} = 132171$ $Ahorr_{an,med,VLSFO} = 163423 \text{ [€/ yr]}$ $Ahorr_{mas,an,sub,MDO} = 382,5 \text{ [T/ yr]}$ $B_{mdo} = 0,0001865 \text{ [T/ (kW·hr)]}$ $CEPCI_{feb2021} = 637,8$ $CL = 26935 \text{ [€]}$ $COC = 202010 \text{ [€]}$ $Cons_{an,MDO} = 1244 \text{ [T/ yr]}$ $ACF_{med,MDO} = 145837 \text{ [€/ yr]}$ $ACF_{VLSFO} = 51783$ $Ahorro\%_{anu,VLSFO} = 30,74$ $Ahorr_{an,med,MDO} = 187501 \text{ [€/ yr]}$ $Ahorr_{an,VLSFO} = 93447$ $Ahorr_{mas,an,sub,VLSFO} = 406,3 \text{ [T/ yr]}$ $B_{vlsfo} = 0,0001981 \text{ [T/ (kW·hr)]}$ $CEPCI_{mar2019} = 616$ $CNT = 134673 \text{ [€]}$ $CON = 367290 \text{ [€]}$ $Cons_{an,VLSFO} = 1321 \text{ [T/ yr]}$

$Cost_{MDO} = 345,6$	$Cost_{med,MDO} = 490,2$
$Cost_{med,VLSFO} = 402,3$	$Cost_{unit} = 7313$
$Cost_{VLSFO} = 230$	$DFCI = 1,347E+06$ [€]
$EGS = 166950$ [€]	$hr_{oc,an} = 7200$ [hr/yr]
$IFCI = 530567$ [€]	$INS = 250425$ [€]
$ISC = 111300$ [€]	$MEL = 61215$ [€]
$O\&M = 41663$ [€/yr]	$PBP_{MDO} = 23,02$
$PBP_{med,MDO} = 14,28$	$PBP_{med,VLSFO} = 17,11$
$PBP_{VLSFO} = 40,23$	$PEC = 556500$ [€]
$SU = 134673$ [€]	$TCI_{feb2021} = 2083172,94$ [€]
$TCI_{mar2019} = 2011970,10$ [€]	$TFCI = 1,877E+06$
$Wn_{R1234zeE} = 284,8$	$W_{MAN,aux} = 926,5$ [kW]


No unit problems were detected.


Parametric Table: Table 1

	$Cost_{VLSFO}$	$Cost_{MDO}$	PBP_{MDO}	PBP_{VLSFO}
Run 1	599,9	639,9	10,26	10,31
Run 2	584,5	627,7	10,5	10,64
Run 3	569	615,4	10,75	10,99
Run 4	553,6	603,1	11,02	11,37
Run 5	538,2	590,9	11,3	11,77
Run 6	522,8	578,6	11,6	12,2
Run 7	507,4	566,3	11,91	12,67
Run 8	492	554,1	12,24	13,17
Run 9	476,6	541,8	12,58	13,71
Run 10	461,2	529,5	12,95	14,3
Run 11	445,8	517,3	13,34	14,94
Run 12	430,4	505	13,75	15,64
Run 13	414,9	492,7	14,19	16,41
Run 14	399,5	480,5	14,66	17,27
Run 15	384,1	468,2	15,16	18,21
Run 16	368,7	455,9	15,7	19,27
Run 17	353,3	443,7	16,27	20,45
Run 18	337,9	431,4	16,89	21,79
Run 19	322,5	419,2	17,56	23,31
Run 20	307,1	406,9	18,28	25,07
Run 21	291,7	394,6	19,06	27,11
Run 22	276,2	382,4	19,92	29,52
Run 23	260,8	370,1	20,85	32,39
Run 24	245,4	357,8	21,88	35,89
Run 25	230	345,6	23,02	40,23


3 REPORTS DE LAS SIMULACIONES DE LOS CICLOS REALES


3.1 Ciclo subcrítico de R236ea con aire de barrido

1	 Company Name Not Available Bedford, MA USA		Case Name: V11_R236ea_análisis_económico.hsc			
2			Unit Set: NewUser1			
3			Date/Time: Tue Jul 20 21:38:42 2021			
4						
5	Workbook: Case (Main)					
6						
7						
8						
9	Material Streams					Fluid Pkg: All
10						
11	Name	2	3	4	5	6
12	Vapour Fraction	0.0000 *	0.0000	0.0442	1.0000	1.0000
13	Temperature (C)	41.22	79.37	120.3	120.2	62.96
14	Pressure (bar)	23.94 *	23.88	23.82	23.69	3.520 *
15	Mass Enthalpy (kJ/kg)	-8906	-8856	-8790	-8716	-8740
16	Mass Entropy (kJ/kg-C)	-2.957	-2.805	-2.628	-2.441	-2.424
17	Mass Flow (kg/s)	28.70	28.70	28.70	28.70	28.70
18	Heat Flow (kW)	-2.556e+005	-2.541e+005	-2.522e+005	-2.501e+005	-2.508e+005
19	Name	7	8	9	12	13
20	Vapour Fraction	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
21	Temperature (C)	40.03	85.00 *	74.57	175.0 *	140.4
22	Pressure (bar)	3.470	3.000 *	2.912	1.500 *	1.176
23	Mass Enthalpy (kJ/kg)	-8908	-1.561e+004	-1.566e+004	21.36	-61.54
24	Mass Entropy (kJ/kg-C)	-2.958	-8.294	-8.418	0.3042	9.692e-002
25	Mass Flow (kg/s)	28.70	33.10 *	33.10	25.42 *	25.42
26	Heat Flow (kW)	-2.556e+005	-5.168e+005	-5.183e+005	542.9	-1564
27	Name	10	11	14	15	1
28	Vapour Fraction	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
29	Temperature (C)	167.0 *	129.3	25.00 *	27.43	40.03 *
30	Pressure (bar)	3.220 *	2.905	1.500 *	0.7102	3.470 *
31	Mass Enthalpy (kJ/kg)	142.5	104.3	-1.587e+004	-1.586e+004	-8908
32	Mass Entropy (kJ/kg-C)	5.886e-002	-2.363e-003	-9.061	-9.027	-2.958
33	Mass Flow (kg/s)	49.89 *	49.89	481.0 *	481.0	28.70 *
34	Heat Flow (kW)	7111	5204	-7.631e+006	-7.627e+006	-2.556e+005
35	Compositions					Fluid Pkg: All
36						
37	Name	2	3	4	5	6
38	Comp Mole Frac (1,1,1,2,3,3-Hexafluorop	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
39	Comp Mole Frac (Water)	***	***	***	***	***
40	Comp Mole Frac (Air)	***	***	***	***	***
41	Comp Mole Frac (Therminol-55)	***	***	***	***	***
42	Name	7	8	9	12	13
43	Comp Mole Frac (1,1,1,2,3,3-Hexafluorop	1.0000	***	***	***	***
44	Comp Mole Frac (Water)	***	1.0000 *	1.0000	***	***
45	Comp Mole Frac (Air)	***	***	***	***	***
46	Comp Mole Frac (Therminol-55)	***	***	***	1.0000 *	1.0000
47	Name	10	11	14	15	1
48	Comp Mole Frac (1,1,1,2,3,3-Hexafluorop	***	***	***	***	1.0000 *
49	Comp Mole Frac (Water)	***	***	1.0000 *	1.0000	***
50	Comp Mole Frac (Air)	1.0000 *	1.0000	***	***	***
51	Comp Mole Frac (Therminol-55)	***	***	***	***	***
52	Energy Streams					Fluid Pkg: All
53						
54	Name	TW	PW			
55	Heat Flow (kW)	672.6	53.32			
56	Pumps					Fluid Pkg: All
57						
58	Name	P				
59	Speed (rpm)	---				
60	Power (kW)	53.32				
61	Capacity(Actual Vol. Flow) (m3/s)	2.084e-002				
62	Feed Pressure (bar)	3.470 *				
63	Product Pressure (bar)	23.94 *				
64	Product Temperature (C)	41.22				
65						
66						
67						
68						
69	Aspen Technology Inc.		Aspen HYSYS Version 12			Page 1 of 2


1	 Company Name Not Available Bedford, MA USA		Case Name: V11_R236ea_análisis_económico.hsc			
2			Unit Set: NewUser1			
3			Date/Time: Tue Jul 20 21:38:42 2021			
4						
5	Workbook: Case (Main) (continued)					
6						
7	Expanders Fluid Pkg: All					
8						
9						
10						
11	Name	turbine				
12	Expander Speed (rpm)	---				
13	Power (kW)	672.6				
14	Capacity (act feed vol flow) (ACT_m3/s)	0.1509				
15	Feed Pressure (bar)	23.69				
16	Product Pressure (bar)	3.520 *				
17	Product Temperature (C)	62.96				
18	Surge flow rate (ACT_m3/s)	---				
19						
20	Heat Exchangers Fluid Pkg: All					
21	Name	J WHE	SAHE	T55HE	COND	
22	Duty (kW)	1449	1907	2107	4844	
23	Tube Side Feed Mass Flow (kg/s)	28.70	28.70	28.70	481.0 *	
24	Shell Side Feed Mass Flow (kg/s)	33.10 *	49.89 *	25.42 *	28.70	
25	Tube Inlet Temperature (C)	41.22	79.37	120.3	25.00 *	
26	Tube Outlet Temperature (C)	79.37	120.3	120.2	27.43	
27	Shell Inlet Temperature (C)	85.00 *	167.0 *	175.0 *	62.96	
28	Shell Outlet Temperature (C)	74.57	129.3	140.4	40.03	
29						
30	Unit Ops					
31	Operation Name	Operation Type	Feeds	Products	Ignored	Calc Level
32	P	Pump	1	2	No	500.0 *
33			PW			
34	J WHE	Heat Exchanger	2	3	No	500.0 *
35			8	9		
36	SAHE	Heat Exchanger	3	4	No	500.0 *
37			10	11		
38	T55HE	Heat Exchanger	4	5	No	500.0 *
39			12	13		
40	COND	Heat Exchanger	14	15	No	500.0 *
41			6	7		
42	turbine	Expander	5	6	No	500.0 *
43				TW		
44	Parámetros de circuito	Spreadsheet			No	500.0 *
45	RCY-1	Recycle	7	1	No	3500 *
46						
47						
48						
49						
50						
51						
52						
53						
54						
55						
56						
57						
58						
59						
60						
61						
62						
63						
64						
65						
66						
67						
68						
69	Aspen Technology Inc.		Aspen HYSYS Version 12		Page 2 of 2	


3.2 Ciclo transcrito de R1234ze(E) con aire de barrido

1	 Company Name Not Available Bedford, MA USA		Case Name: V11_R1234ze_analisis economico.hsc			
2			Unit Set: NewUser1			
3			Date/Time: Tue Jul 20 22:09:17 2021			
4						
5						
6	Workbook: Case (Main)					
7						
8						
9	Streams					Fluid Pkg: All
10						
11	Name	1	2	3	4	5
12	Mass Flow (kg/s)	35.88 *	35.88	35.88	35.88	35.88
13	Temperature (C)	39.87 *	42.73	75.36	120.0	140.3
14	Pressure (bar)	7.721 *	43.97 *	43.93	43.84	43.51
15	Mass Enthalpy (kJ/kg)	-7193	-7189	-7141	-7036	-6976
16	Mass Entropy (kJ/kg-C)	-2.508	-2.506	-2.361	-2.080	-1.932
17	Vapour Fraction	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	1.0000
18	Heat Flow (kW)	-2.581e+005	-2.580e+005	-2.562e+005	-2.525e+005	-2.503e+005
19	Name	6	8	9	10	11
20	Mass Flow (kg/s)	35.88	33.10 *	33.10	49.89 *	49.89
21	Temperature (C)	72.92	85.00 *	72.56	167.0 *	92.47
22	Pressure (bar)	7.790 *	3.000 *	2.734	3.220 *	3.159
23	Mass Enthalpy (kJ/kg)	-7004	-1.561e+004	-1.567e+004	142.5	67.09
24	Mass Entropy (kJ/kg-C)	-1.911	-8.294	-8.442	5.886e-002	-0.1234
25	Vapour Fraction	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000	1.0000
26	Heat Flow (kW)	-2.513e+005	-5.168e+005	-5.186e+005	7111	3347
27	Name	12	13	14	15	7
28	Mass Flow (kg/s)	25.17 *	25.17	634.0 *	634.0	35.88
29	Temperature (C)	175.0 *	139.4	25.00 *	28.10	39.87
30	Pressure (bar)	1.500 *	1.191	1.500 *	0.2361	7.721
31	Mass Enthalpy (kJ/kg)	21.36	-63.95	-1.587e+004	-1.585e+004	-7193
32	Mass Entropy (kJ/kg-C)	0.3042	9.059e-002	-9.061	-9.017	-2.508
33	Vapour Fraction	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
34	Heat Flow (kW)	537.5	-1609	-1.006e+007	-1.005e+007	-2.581e+005
35	Name	TW	PW			
36	Mass Flow (kg/s)	---	---			
37	Temperature (C)	---	---			
38	Pressure (bar)	---	---			
39	Mass Enthalpy (kJ/kg)	---	---			
40	Mass Entropy (kJ/kg-C)	---	---			
41	Vapour Fraction	---	---			
42	Heat Flow (kW)	1019	146.2			
43	Heat Exchangers					Fluid Pkg: All
44						
45	Name	J W-HE	SA-HE	TH-HE	COND	
46	Duty (kW)	1728	3764	2161	8148	
47	Tube Side Feed Mass Flow (kg/s)	35.88	35.88	35.88	634.0 *	
48	Shell Side Feed Mass Flow (kg/s)	33.10 *	49.89 *	25.17 *	35.88	
49	Tube Inlet Temperature (C)	42.73	75.36	120.0	25.00 *	
50	Tube Outlet Temperature (C)	75.36	120.0	140.3	28.10	
51	Shell Inlet Temperature (C)	85.00 *	167.0 *	175.0 *	72.92	
52	Shell Outlet Temperature (C)	72.56	92.47	139.4	39.87	
53						
54	Compositions					Fluid Pkg: All
55	Name	1	2	3	4	5
56	Comp Mole Frac (Air)		***	***	***	***
57	Comp Mole Frac (Water)		***	***	***	***
58	Comp Mole Frac (Therminol-55)		***	***	***	***
59	Comp Mole Frac (Trans-1,3,3,3-Tetrafluor	1.0000 *	1.0000 *	1.0000 *	1.0000 *	1.0000 *
60	Name	6	8	9	10	11
61	Comp Mole Frac (Air)		***	***	1.0000 *	1.0000 *
62	Comp Mole Frac (Water)		***	1.0000 *	***	***
63	Comp Mole Frac (Therminol-55)		***	***	***	***
64	Comp Mole Frac (Trans-1,3,3,3-Tetrafluor	1.0000 *	***	***	***	***
65						
66						
67						
68						
69	Aspen Technology Inc.		Aspen HYSYS Version 12		Page 1 of 2	


1	 Company Name Not Available Bedford, MA USA		Case Name: V11_R1234ze_analisis economico.hsc			
2			Unit Set: NewUser1			
3			Date/Time: Tue Jul 20 22:09:17 2021			
4						
5	Workbook: Case (Main) (continued)					
6						
7	Compositions (continued)					
8						Fluid Pkg: All
9	Name	12	13	14	15	7
10	Comp Mole Frac (Air)	***	***	***	***	***
11	Comp Mole Frac (Water)	***	***	1.0000 *	1.0000 *	***
12	Comp Mole Frac (Therminol-55)	1.0000 *	1.0000 *	***	***	***
13	Comp Mole Frac (Trans-1,3,3,3-Tetrafluor	***	***	***	***	1.0000 *
14	Energy Streams					Fluid Pkg: All
15	Name	TW	PW			
16	Heat Flow (kW)	1019	146.2			
17	Pumps					Fluid Pkg: All
18	Name	P				
19	Speed (rpm)	---				
20	Power (kW)	146.2				
21	Capacity(Actual Vol. Flow) (m3/s)	3.227e-002				
22	Feed Pressure (bar)	7.721 *				
23	Product Pressure (bar)	43.97 *				
24	Product Temperature (C)	42.73				
25	Expanders					Fluid Pkg: All
26	Name	EXPANDER				
27	Expander Speed (rpm)	---				
28	Power (kW)	1019				
29	Capacity (act feed vol flow) (ACT_m3/s)	0.1476				
30	Feed Pressure (bar)	43.51				
31	Product Pressure (bar)	7.790 *				
32	Product Temperature (C)	72.92				
33	Surge flow rate (ACT_m3/s)	---				
34	Unit Ops					
35	Operation Name	Operation Type	Feeds	Products	Ignored	Calc Level
36	P	Pump	1 PW	2	No	500.0 *
37	J W-HE	Heat Exchanger	2 8	3 9	No	500.0 *
38	SA-HE	Heat Exchanger	3 10	4 11	No	500.0 *
39	TH-HE	Heat Exchanger	4 12	5 13	No	500.0 *
40	COND	Heat Exchanger	14 6	15 7	No	500.0 *
41	EXPANDER	Expander	5	6 TW	No	500.0 *
42	potencias intercambiadores	Spreadsheet			No	500.0 *
43	ADJ -1	Adjust			No	3500 *
44	RCY-1	Recycle	7	1	No	3500 *
45						
46						
47						
48						
49						
50						
51						
52						
53						
54						
55						
56						
57						
58						
59						
60						
61						
62						
63						
64						
65						
66						
67						
68						
69	Aspen Technology Inc.	Aspen HYSYS Version 12			Page 2 of 2	


3.3 Ciclo subcrítico de R236ea sin aire de barrido

1	 Company Name Not Available Bedford, MA USA		Case Name: V12_R236ea_sin aire_estudio económico.hsc				
2			Unit Set: NewUser7				
3			Date/Time: Wed Jul 21 00:14:21 2021				
4							
5							
6	Workbook: Case (Main)						
7							
8							
9	Streams						
10						Fluid Pkg: All	
11	Name	2	3	1	4	5	
12	Mass Flow (kg/s)	15.53	15.53	15.53 *	15.53	15.53	
13	Temperature (C)	41.46	80.52	40.27 *	120.0	62.28	
14	Pressure (bar)	24.10 *	23.91	3.412 *	23.69	3.446 *	
15	Mass Enthalpy (kJ /kg)	-8906	-8854	-8908	-8716	-8740	
16	Mass Entropy (kJ /kg-C)	-2.956	-2.801	-2.957	-2.442	-2.424	
17	Vapour Fraction	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	1.0000	
18	Name	6	7	8	9	10	
19	Mass Flow (kg/s)	15.53	33.10 *	33.10	27.67 *	27.67	
20	Temperature (C)	40.26	85.00 *	79.22	175.0 *	142.7	
21	Pressure (bar)	3.412	3.000 *	2.910	1.500 *	1.017	
22	Mass Enthalpy (kJ /kg)	-8908	-1.561e+004	-1.564e+004	21.36	-56.11	
23	Mass Entropy (kJ /kg-C)	-2.957	-8.294	-8.362	0.3042	0.1112	
24	Vapour Fraction	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
25	Name	11	12	TW	PW		
26	Mass Flow (kg/s)	154.1 *	154.1	--	--		
27	Temperature (C)	25.00 *	29.06	--	--		
28	Pressure (bar)	1.500 *	1.082	--	--		
29	Mass Enthalpy (kJ /kg)	-1.587e+004	-1.585e+004	--	--		
30	Mass Entropy (kJ /kg-C)	-9.061	-9.004	--	--		
31	Vapour Fraction	0.0000	0.0000	--	--		
32	Heat Exchangers						
33						Fluid Pkg: All	
34	Name	T55HE	COND	J W He Ex			
35	Duty (kW)	2144	2608	803.6			
36	Tube Side Feed Mass Flow (kg/s)	15.53	154.1 *	15.53			
37	Shell Side Feed Mass Flow (kg/s)	27.67 *	15.53	33.10 *			
38	Tube Inlet Temperature (C)	80.52	25.00 *	41.46			
39	Tube Outlet Temperature (C)	120.0	29.06	80.52			
40	Shell Inlet Temperature (C)	175.0 *	62.28	85.00 *			
41	Shell Outlet Temperature (C)	142.7	40.26	79.22			
42	Pumps						
43						Fluid Pkg: All	
44	Name	P					
45	Speed (rpm)	---					
46	Power (kW)	29.18					
47	Capacity(Actual Vol. Flow) (m3/s)	1.129e-002					
48	Feed Pressure (bar)	3.412 *					
49	Product Pressure (bar)	24.10 *					
50	Product Temperature (C)	41.46					
51	Expanders						
52						Fluid Pkg: All	
53	Name	Expander					
54	Expander Speed (rpm)	---					
55	Power (kW)	367.8					
56	Capacity (act feed vol flow) (ACT_m3/s)	8.140e-002					
57	Feed Pressure (bar)	23.69					
58	Product Pressure (bar)	3.446 *					
59	Product Temperature (C)	62.28					
60	Surge flow rate (ACT_m3/s)	---					
61							
62							
63							
64							
65							
66							
67							
68							
69	Aspen Technology Inc.		Aspen HYSYS Version 12			Page 1 of 2	

1	 Company Name Not Available Bedford, MA USA		Case Name: V12_R236ea_sin aire_estudio económico.hsc			
2			Unit Set: NewUser7			
3			Date/Time: Wed Jul 21 00:14:21 2021			
4						
5						
6	Workbook: Case (Main) (continued)					
7						
8						
9	Material Streams Fluid Pkg: All					
10						
11	Name	2	3	1	4	5
12	Vapour Fraction	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	1.0000
13	Temperature (C)	41.46	80.52	40.27 *	120.0	62.28
14	Pressure (bar)	24.10 *	23.91	3.412 *	23.69	3.446 *
15	Molar Flow (kgmole/h)	367.7	367.7	367.7	367.7	367.7
16	Mass Flow (kg/s)	15.53	15.53	15.53 *	15.53	15.53
17	Liquid Volume Flow (m3/h)	39.19	39.19	39.19	39.19	39.19
18	Heat Flow (kW)	-1.383e+005	-1.375e+005	-1.383e+005	-1.354e+005	-1.357e+005
19	Name	6	7	8	9	10
20	Vapour Fraction	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
21	Temperature (C)	40.26	85.00 *	79.22	175.0 *	142.7
22	Pressure (bar)	3.412	3.000 *	2.910	1.500 *	1.017
23	Molar Flow (kgmole/h)	367.7	6614	6614	311.3	311.3
24	Mass Flow (kg/s)	15.53	33.10 *	33.10	27.67 *	27.67
25	Liquid Volume Flow (m3/h)	39.19	119.4	119.4	114.4	114.4
26	Heat Flow (kW)	-1.383e+005	-5.168e+005	-5.177e+005	591.0	-1552
27	Name	11	12			
28	Vapour Fraction	0.0000	0.0000			
29	Temperature (C)	25.00 *	29.06			
30	Pressure (bar)	1.500 *	1.082			
31	Molar Flow (kgmole/h)	3.080e+004	3.080e+004			
32	Mass Flow (kg/s)	154.1 *	154.1			
33	Liquid Volume Flow (m3/h)	555.9	555.9			
34	Heat Flow (kW)	-2.445e+006	-2.443e+006			
35	Energy Streams Fluid Pkg: All					
36						
37	Name	TW	PW			
38	Heat Flow (kW)	367.8	29.18			
39						
40	Unit Ops					
41	Operation Name	Operation Type	Feeds	Products	Ignored	Calc Level
42	P	Pump	1	2	No	500.0 *
43			PW			
44	Expander	Expander	4	5	No	500.0 *
45				TW		
46	T55HE	Heat Exchanger	3	4	No	500.0 *
47			9	10		
48	COND	Heat Exchanger	11	12	No	500.0 *
49			5	6		
50	J W He Ex	Heat Exchanger	2	3	No	500.0 *
51			7	8		
52	Caudales y potencias	Spreadsheet			No	500.0 *
53	RCY-1	Recycle	6	1	No	3500 *
54						
55						
56						
57						
58						
59						
60						
61						
62						
63						
64						
65						
66						
67						
68						
69	Aspen Technology Inc.		Aspen HYSYS Version 12		Page 2 of 2	

3.4 Ciclo transcrito de R1234ze(E) sin aire de barrido

1	 Company Name Not Available Bedford, MA USA		Case Name: V12_R1234ze_sin aire_estudio económico.hsc				
2			Unit Set: NewUser1				
3			Date/Time: Wed Jul 21 00:11:48 2021				
4							
5							
6	Workbook: Case (Main)						
7							
8							
9	Pumps					Fluid Pkg: All	
10							
11	Name	P					
12	Speed (rpm)	---					
13	Power (kW)	55.91					
14	Capacity(Actual Vol. Flow) (m3/s)	1.230e-002					
15	Feed Pressure (bar)	7.664 *					
16	Product Pressure (bar)	44.02 *					
17	Product Temperature (C)	42.74					
18	Expanders					Fluid Pkg: All	
19							
20	Name	EXPANDER					
21	Expander Speed (rpm)	---					
22	Power (kW)	389.9					
23	Capacity (act feed vol flow) (ACT_m3/s)	5.621e-002					
24	Feed Pressure (bar)	43.50					
25	Product Pressure (bar)	7.703 *					
26	Product Temperature (C)	72.42					
27	Surge flow rate (ACT_m3/s)	---					
28	Streams					Fluid Pkg: All	
29							
30	Name	1	2	3	4	5	
31	Mass Flow (kg/s)	13.68 *	13.68	13.68	13.68	13.68	
32	Temperature (C)	39.87 *	42.74	80.02	140.1	72.42	
33	Pressure (bar)	7.664 *	44.02 *	43.64	43.50	7.703 *	
34	Mass Enthalpy (kJ /kg)	-7193	-7189	-7134	-6976	-7005	
35	Mass Entropy (kJ /kg-C)	-2.508	-2.506	-2.340	-1.932	-1.912	
36	Vapour Fraction	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	1.0000	
37	Name	6	7	8	9	10	
38	Mass Flow (kg/s)	13.68	33.10 *	33.10	24.42 *	24.42	
39	Temperature (C)	39.86	85.00 *	79.54	175.0 *	138.1	
40	Pressure (bar)	7.664	3.000 *	2.820	1.500 *	1.216	
41	Mass Enthalpy (kJ /kg)	-7193	-1.561e+004	-1.564e+004	21.36	-66.85	
42	Mass Entropy (kJ /kg-C)	-2.508	-8.294	-8.358	0.3042	8.291e-002	
43	Vapour Fraction	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
44	Name	11	12	TW	PW		
45	Mass Flow (kg/s)	106.0 *	106.0	---	---		
46	Temperature (C)	25.00 *	30.83	---	---		
47	Pressure (bar)	1.500 *	1.355	---	---		
48	Mass Enthalpy (kJ /kg)	-1.587e+004	-1.584e+004	---	---		
49	Mass Entropy (kJ /kg-C)	-9.061	-8.980	---	---		
50	Vapour Fraction	0.0000	0.0000	---	---		
51	Heat Exchangers					Fluid Pkg: All	
52							
53	Name	J W heat ex	Therm He Ex	COND			
54	Duty (kW)	759.7	2154	2580			
55	Tube Side Feed Mass Flow (kg/s)	13.68	13.68	106.0 *			
56	Shell Side Feed Mass Flow (kg/s)	33.10 *	24.42 *	13.68			
57	Tube Inlet Temperature (C)	42.74	80.02	25.00 *			
58	Tube Outlet Temperature (C)	80.02	140.1	30.83			
59	Shell Inlet Temperature (C)	85.00 *	175.0 *	72.42			
60	Shell Outlet Temperature (C)	79.54	138.1	39.86			
61	Energy Streams					Fluid Pkg: All	
62							
63	Name	TW	PW				
64	Heat Flow (kW)	389.9	55.91				
65	Unit Ops						
66							
67	Operation Name	Operation Type	Feeds	Products	Ignored	Calc Level	
68	P	Pump	1	2	No	500.0 *	
69	Aspen Technology Inc.		Aspen HYSYS Version 12			Page 1 of 2	

1	 Company Name Not Available Bedford, MA USA		Case Name: V12_R1234ze_sin aire_estudio económico.hsc			
2			Unit Set: NewUser1			
3			Date/Time: Wed Jul 21 00:11:48 2021			
4						
5						
6	Workbook: Case (Main) (continued)					
7						
8	Unit Ops (continued)					
9						
10						
11	Operation Name	Operation Type	Feeds	Products	Ignored	Calc Level
12	P	Pump	PW		No	500.0 *
13	EXPANDER	Expander	4	5	No	500.0 *
14				TW		
15	Caudales y potencias	Spreadsheet			No	500.0 *
16	JW heat ex	Heat Exchanger	2	3	No	500.0 *
17			7	8		
18	Therm He Ex	Heat Exchanger	3	4	No	500.0 *
19			9	10		
20	COND	Heat Exchanger	11	12	No	500.0 *
21			5	6		
22	RCY-1	Recycle	6	1	No	3500 *
23	ADJ -1	Adjust			No	3500 *
24						
25						
26						
27						
28						
29						
30						
31						
32						
33						
34						
35						
36						
37						
38						
39						
40						
41						
42						
43						
44						
45						
46						
47						
48						
49						
50						
51						
52						
53						
54						
55						
56						
57						
58						
59						
60						
61						
62						
63						
64						
65						
66						
67						
68						
69	Aspen Technology Inc.		Aspen HYSYS Version 12		Page 2 of 2	

