



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN
EMISIONES DE CO₂

MARITIME TRANSPORT SIMULATION WITHOUT
CO2 EMISSIONS

Autor

JOSÉ MARÍA MARTÍNEZ VALTUEÑA

Director

LUIS MIGUEL ROMEO GIMÉNEZ

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

AÑO 2017

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

RESUMEN

El transporte es uno de los medios de contaminación más importantes en la actualidad y un factor muy influyente en el cambio climático. Dentro del transporte hay una gran variedad de medios, el que se va a tratar en este trabajo va a ser el transporte marítimo.

El proyecto plantea una manera de propulsión alternativa, para intentar evitar al máximo uno de los principales contaminantes como es la emisión de CO_2 .

La primera etapa va a consistir en una descripción de la embarcación y la manera de propulsión de la misma. Una vez definidos estos parámetros, se plantean diferentes métodos de captura de CO_2 y se estudia la viabilidad de la instalación de algunos de ellos en el interior del barco.

Una vez definido qué proceso es el más adecuado para las características dadas, se procede a una simulación por medio del programa EES. La simulación se dividirá en dos partes. La primera parte plantea el ciclo de vapor simple, es decir, sin captura de CO_2 . La segunda parte añade al ciclo el proceso de separación del CO_2 . Con los datos obtenidos para ambas simulaciones, se hace una comparativa de los resultados más importantes.

Después, se estudia la relación existente entre el comportamiento del motor para diferentes cargas y el consumo de la embarcación para cada una de ellas. Todo esto acompañado de gráficas, donde se puedan comparar los casos planteados y las diferencias obtenidas.

A continuación, se hace un breve estudio económico del caso. Se plantea las tasas sancionadoras atribuidas a las emisiones de CO_2 en la actualidad y las que se prevén para los próximos años. Comparando la viabilidad económica del proyecto en función de las sanciones aplicadas.

Por último, se expondrán las conclusiones tomadas a partir del conjunto de resultado que se han ido obteniendo en el desarrollo del proyecto.

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS Y ALCANCE.....	6
2.1 OBJETIVO PRINCIPAL.....	6
2.2 OBJETIVOS PARCIALES	6
2.3 ALCANCE.....	6
3. DESARROLLO	7
3.1 MARCO TEÓRICO.....	7
3.1.1 SUSTITUCIÓN DEL COMBUSTIBLE FUELOIL POR GAS NATURAL LÍQUIDO	7
3.1.2 CAPTURA DEL CO ₂ GENERADO EN EL CICLO DE VAPOR.....	7
3.2 SISTEMA DE PROPULSIÓN	9
3.2.1 ELÉCTRICA	9
3.2.2 MECÁNICA.....	9
3.3 MODELO DEL SISTEMA DE ENERGÍA DEL BARCO	10
3.3.1 DESARROLLO DEL MOTOR DIESEL MARINO.....	11
3.3.2 SISTEMA ENERGÉTICO DEL BARCO	13
3.3.3 DESARROLLO DEL MODELO DE CAPTURA DE CO ₂	15
3.3.4 DESARROLLO DEL MODELO SELECCIONADO	17
3.3.5 SISTEMA DE ENERGÍA DEL BARCO.....	19
4. SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE PROPULSIÓN MARÍTIMA SIN CAPTURA DE CO ₂	23
4.1 CALDERA DE RECUPERACIÓN.....	24
4.2 TURBINAS.....	25
4.3 CONDENSADOR	28
4.4 BOMBA 2	29
4.5 INTERCAMBIADORES.....	30
4.6 BOMBA 1	33
4.7 CALCULOS GLOBALES DEL CICLO	34
5. SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE PROPULSIÓN MARÍTIMA CON CAPTURA DE CO ₂	35
5.1 CALCULOS GLOBALES DEL CICLO CON CAPTURA DE CO ₂	36
5.2 COMPARATIVA DE RESULTADOS OBTENIDOS EN AMBOS CICLOS	37
6. MOTOR Y CONSUMO	39
7. BREVE COMPARACIÓN ECÓNOMICA.....	45
8. CONCLUSIONES	47
9. BIBLIOGRAFÍA	50

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

1. INTRODUCCIÓN

La forma de obtención de energía en un futuro próximo es un problema que hoy en día afecta a la mayoría de la población mundial. Uno de los objetivos de este proyecto es plantear una posible mitigación a este problema.

El sector del transporte es uno de los pilares financieros a nivel global; ya sean por mar, tierra o aire. El transporte marítimo es el más utilizado para el traslado de mercancías a larga distancia. Representa aproximadamente el 80 % del transporte mundial de mercancía [2]. Pese a que el tiempo de entregas es mayor, es a su vez el medio más barato. El medio aéreo, complementario al marítimo, es notablemente más rápido (plazos de entrega en torno a una semana) pero a su vez considerablemente más caro (el coste de los fletes depende del volumen y el peso a transportar). A nivel mundial, dado el gran volumen transportado (la cifra ronda los 9.840 millones de toneladas al año) [2] prima el medio marítimo, siendo el aéreo utilizado para envíos urgentes.

Continuando el análisis del sector marítimo, es también destacable la gran oferta de turismo de cruceros. Embarcaciones altamente equipadas que hace que este sector sea un referente para muchas personas a la hora de elegir vacaciones.

El turismo de cruceros genera 18 billones de dólares al año en concepto del gasto de los pasajeros [21] y ha sido el segmento de más rápido crecimiento de la industria turística en los últimos 20 años con una tasa promedio anual de crecimiento en el número pasajeros de 7.4%. Crecimiento equivalente a casi dos veces el porcentaje de crecimiento del turismo internacional. El año 2017 se transportaron 25,8 millones de pasajeros en todo el mundo, 4.1% más con respecto al año anterior. [20]

En base a todos estos datos, se puede observar que el alcance que tiene un sector como el marítimo es enorme a nivel mundial y que las cifras de dinero alcanzadas llegan a ser, nunca mejor dicho, mareantes.

Pese a las ventajas explicadas, también conlleva unas consecuencias negativas que repercuten en la sociedad. Nos referimos a los niveles de contaminación producidos por la actividad del sector.

Cotejando datos oficiales de la OMI (Organización Marítima Internacional) [2] el transporte marítimo engloba una cifra del 3% de la contaminación global de CO₂ del planeta y entre un 8% y 20% de la contaminación total en la zona mediterránea.

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

Como dato del análisis de la contaminación atmosférica derivada de los cruceros llevado al ámbito nacional, tenemos el caso de Barcelona. Con unas cifras de concentración de partículas atmosféricas en calles de Barcelona de hasta **428.000 partículas por millón** [12], tres veces mayor a lo obtenido en otras ciudades europeas como Berlín.

¿Cómo va este proyecto a afrontar estas cuestiones ambientales?

La constitución de los objetivos se ha desarrollado en seis capítulos (del 3 al 8) en torno a los cuales se estructura el proyecto:

- En el capítulo 3 se explicará la base teórica en la que se cimentan los estudios realizados. Detallando la propulsión del barco y los diferentes modelos de separación de *CO₂* ha tener en cuenta para la embarcación seleccionada.
- En el capítulo 4 se desarrollará la simulación del diseño de un ciclo Rankine sencillo añadido a la propulsión de la embarcación.
- En el capítulo 5 se integrará la etapa de captura de *CO₂* desarrollando también su simulación con la correspondiente presentación de los resultados obtenidos.
- En el capítulo 6 se procede a un análisis más detallado de los datos obtenidos y su correspondiente explicación por medio de tablas y gráficas para un amplio desarrollo.
- En el capítulo 7 se hace una pequeña comparación del gasto económico del barco dependiendo de si tiene o no el ciclo de captura de *CO₂* instalado.
- Finalmente, en el capítulo 8 se muestra una comparativa entre los diferentes sistemas planteados anteriormente y se analiza si la implantación de dichas medidas tendría las consecuencias positivas esperadas.

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

2. OBJETIVO Y ALCANCE

2.1 Objetivo principal

El objetivo principal por tanto es, una vez conocidas las consecuencias derivadas del transporte marítimo y el alcance negativo que pueden llegar a tener, tratar de mostrar por medio de la simulación diferentes caminos para poder reducir el impacto ambiental, ofreciendo una serie de alternativas que traten de eliminar o reducir esta contaminación descrita anteriormente.

El punto de partida es un barco carguero de tamaño medio (barco mercantil real), en el que se van a plantear diferentes escenarios en base a las modificaciones propuestas. Tras este ejercicio analizaremos los resultados.

2.2 Objetivos parciales

- 2.2.1 Realizar el diseño y la simulación a partir del software EES de los siguientes subsistemas como partes individuales.
- 2.2.2 Simulaciones verificando las hipótesis planteadas:
 - Simulación de sistemas de propulsión marítima: caso de referencia
 - Simulación de sistemas de propulsión marítima con captura de CO₂.
 - Representación gráfica de resultados obtenidos tanto para antes de la instalación de la separación de CO₂ como después, por medio del uso de hojas de cálculo Excel.
- 2.2.3 Elaborar un análisis comparativo de los resultados obtenidos antes y después de la integración.
- 2.2.4 Demostración económica de la viabilidad del proyecto.

2.3 Alcance

Queda fuera del alcance del proyecto toda evaluación o balance económico que se derive de los resultados obtenidos como pudieran ser las modificaciones tecnológicas o innovaciones necesarias en el proceso productivo para llevar a cabo la realización física del proceso. Simplemente se trata de exponer los resultados perseguidos con los que se pueda tener un punto de partida para un análisis más profundo y exacto del sistema planteado.

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

3. DESARROLLO

3.1 Marco teórico

El eje principal en el que se va a centrar el proyecto será en que la cantidad de emisiones de CO₂ se vean reducidas por la implementación del proceso de absorción al ciclo Rankine. Por otra parte, se tratará de realizar la mayor recuperación de flujos excedentes de energía, los cuales, al integrarlos de nuevo al proceso permitirán un ahorro en el consumo de combustible y por consiguiente en las emisiones de CO₂, al mismo tiempo que permite aumentar la eficiencia del proceso.

El barco planteado consta de dos motores que, trabajando en paralelo, suministrarán una potencia total de 17.000 kW. Las alternativas a estudiar son:

3.1.1 Sustitución del combustible fueloil normal por gas natural líquido

La elección de gas natural líquido como alternativa al fueloil se debe a varias razones: el fueloil pesado, que es el combustible usado mayoritariamente, contiene hasta 3500 veces más azufre que el diésel que usan los automóviles, y como alternativa aparece el gas natural. El problema que se plantea es la adaptación de la embarcación a este combustible. Sólo un número muy reducido de barcos están preparados en la actualidad.

La combustión de este gas permite una reducción de los contaminantes generados tras el proceso, destacando la elevada reducción de gases de efecto invernadero como los SOx y NOx. Además, las emisiones de CO₂ se reducen en un 20-25% debido a la baja relación carbono-hidrógeno del combustible, característica idónea en nuestro planteamiento ya que se reduce la necesidad de almacenamiento.

Por otro lado, una de las desventajas de este combustible respecto al fueloil convencional es el tamaño de los tanques de almacenamiento, mayores debido a la menor densidad del gas natural. Por tanto, el volumen reservado para los depósitos de combustible aumentará disminuyendo la capacidad de carga útil.

3.1.2 Separación del CO₂ generado en el ciclo de vapor correspondiente.

Esta segunda modificación va a ser estudiada con más profundidad, analizando los resultados antes y después de añadir el proceso de colección del CO₂. El

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

proceso a realizar consiste en la captura del gas mediante aminas (monoetanolamina MEA o similares).

Los radicales libres de la amina combinan CO₂ con ella, generando un compuesto que necesita muy poca energía para descomponerse y regenerar la amina. Uno de los mayores problemas que se han de superar para su aplicación a gran escala se encuentra en su degradación, es decir, los problemas de corrosión de los solventes ricos en CO₂.

Se presentan dos sistemas de captura de CO₂:

- El sistema de retención está integrado en el sistema de propulsión. el valor de la retención media es del 73%. El impacto económico de esta medida se sitúa en 76,16€/ton CO₂.
- Instalación de una turbina de gas extra, con la finalidad de aportar un mayor uso de energía al proceso de captura. La retención puede alcanzar valores del 90% y el coste del proceso asciende a 161,24€/ton. Este incremento en el precio es principalmente debido a un 21.41% más de consumo de combustible necesario para poder alimentar a la turbina de gas.

En nuestro caso, y ya que el espacio de una embarcación es siempre muy limitado, el primero de los casos parte con ventaja.

Diferencias entre los combustibles:

1. El gas natural, al no llevar refinado como en el caso del petróleo, tiene un costo de producción mucho más barato, repercutiendo en su precio en el mercado, bastante más económico.
2. El gas natural es un combustible alternativo ecológico porque sus emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) se reducen en más de un 85% y el monóxido de carbono (CO) en un 25% menos.
3. El gas natural lanza al aire plomo sin trazas de metales pesados ni partículas sólidas. Las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) son un 40 a 50% menos que el carbón y 25 a 30% menos que el petróleo.
4. Con la captura postcombustión de CO₂ la emisión del gas a la atmósfera se verá casi neutralizada por completo.

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

3.2 Sistema de Propulsión

Dentro del proceso de propulsión para la embarcación elegida, existe un amplio abanico de posibilidades de tecnologías a emplear y de su combinación, se va a realizar una breve explicación para poder mostrar las diferencias encontradas.

La primera división la encontramos en el tipo de propulsión:

3.2.1 Eléctrica

El número de embarcaciones eléctricas es muy reducido ya que su uso limita principalmente a buques que operan principalmente en zonas de ambiente protegido como los *suppliers* (embarcaciones de avituallamiento).

3.2.2 Mecánica

En cuanto a las embarcaciones de propulsión mecánica, presenta a su vez una subdivisión:

- El motor de gasolina es utilizado comúnmente por buques cuya característica principal es la velocidad, como lo son los portacontenedores, cruceros, pesqueros, de guerra, entre otros. Se diferencian del diésel en que la combustión de este se produce mediante una chispa generada en la bujía, mientras que el diésel lo hace por compresión.
- El motor diésel se caracteriza por usarse en dos grandes grupos: los utilizados en la marina comercial o militar, que suelen ser grandes motores diseñados a propósito con ese fin. Este tipo de combustible es utilizado por embarcaciones que requieren de gran potencia para sus labores, entre estas están los remolcadores y los buques rompe hielo.

Propulsión por turbina de gas:

- Una turbina de gas es una turbomáquina motora, cuyo fluido de trabajo es un gas. Como la compresibilidad de los gases no puede ser despreciada, las turbinas de gas son turbomáquinas térmicas. Comúnmente se habla de las turbinas de gas por separado de las turbinas convencionales ya que, aunque funcionan con sustancias en estado gaseoso, sus características de diseño son diferentes. Las turbinas de gas son usadas en los ciclos de potencia como el ciclo *Brayton* y en algunos ciclos de refrigeración. Este es el sistema de propulsión más moderno que existe entre los que usan

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

combustible fósil, cuya ventaja radica en la relación peso-potencia que desarrollan, siendo el elemento primordial de propulsión de los buques de combate. En el campo mercante ha habido también casos donde se instaló después de un auténtico proceso racional de selección. Si bien los consumos de las turbinas de gas modernas son aceptables, del orden de los 180 gramos/CV.h, no pueden competir con los 135 gramos/CV.h del diésel a la hora de conseguir una explotación rentable, especialmente en momentos de crisis como los actuales, donde el gasto en combustible es un factor económico muy a tener en cuenta.

3.3 Modelo del sistema de energía del barco

La tabla 3.1 muestra las características del barco seleccionado. Es un modelo de barco de transporte de tamaño medio. Este barco posee dos motores marinos 9L46 de la marca *Wärtsilä* para proporcionar una potencia de 17MW. Aparte, posee 3MWe de potencia eléctrica suministrada por tres generadores. El combustible consumido por estos motores corresponde con el fueloil marino, que en este estudio va a ser definido como diésel.

Tamaño (GT)	35.000
Longitud (m)	320.0
Anchura (m)	28.2
Calado (m)	7.0
Motor de propulsión	2 * <i>Wärtsilä</i> 9L46
Tara (kg)	12.500
Propulsión (MW)	17.0
Potencia auxiliar (MWe)	3.0

Tabla 3.1 Datos barco

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

El esquema del sistema teórico de energía del barco se puede ver a continuación en la figura 3.1. Hay tres partes principales en el sistema de propulsión, sistema de propulsión auxiliar y el sistema WHR (*Waste Heat Recovery*). El sistema de propulsión consiste en dos motores diésel, que están directamente conectados con dos hélices a sus respectivas cajas de engranajes. Tres generadores eléctricos también conectados con las cajas de engranajes para cubrir parte de la demanda de potencia eléctrica del barco. Hay un sistema WHR por cada tren de propulsión. Una configuración típica de WHR es un ciclo de vapor a presión con un tambor de vapor, un intercambiador de temperatura y una turbina de vapor. El vapor generado proveniente de la caldera mueve la turbina con un generador acoplado al eje para obtener electricidad.

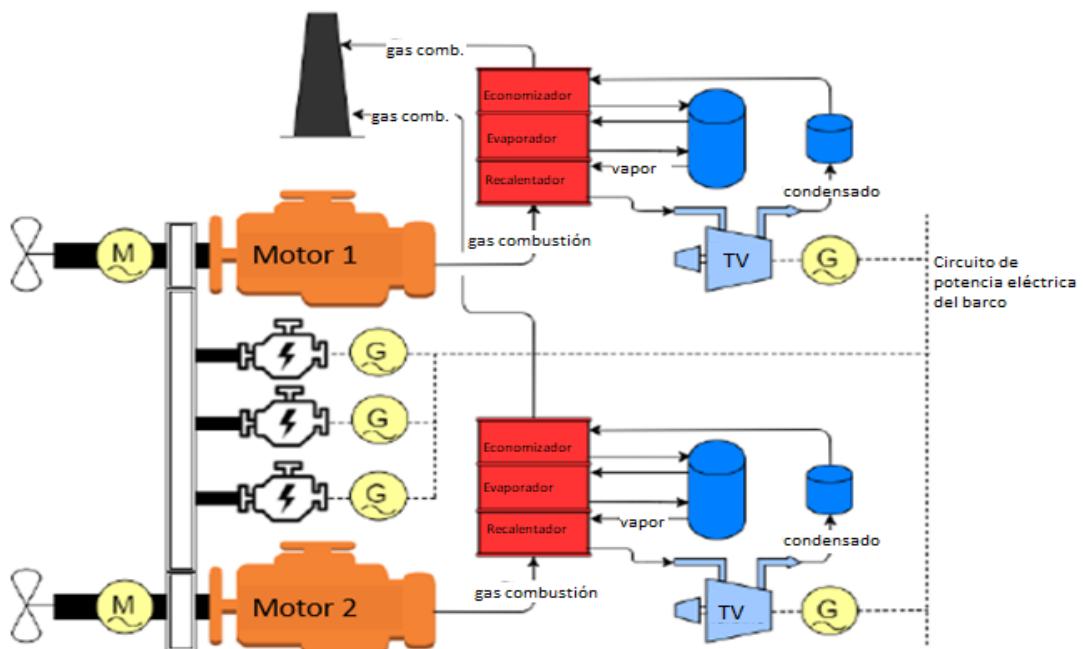


Figura 3.1 Desarrollo modelo de motor diésel marino (Referencia [12])

3.3.1 Desarrollo del motor diésel marino

El motor diésel marino convierte la energía potencial química del fuel en energía mecánica para impulsar el barco. Los barcos más modernos utilizan motores diésel alternativos como motor principal considerando la simplicidad operativa, robustez del aparato y menor consumo.

La parte principal del diseño de un motor marino diésel es modelar el proceso térmico que tiene lugar dentro de los cilindros del motor. Hay dos aspectos a los que prestar más atención: (1) el proceso térmico que se desarrolla en los cilindros

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

que incluye tres etapas: compresión, combustión y expansión; (2) es un movimiento alternativo con salida de trabajo dinámico.

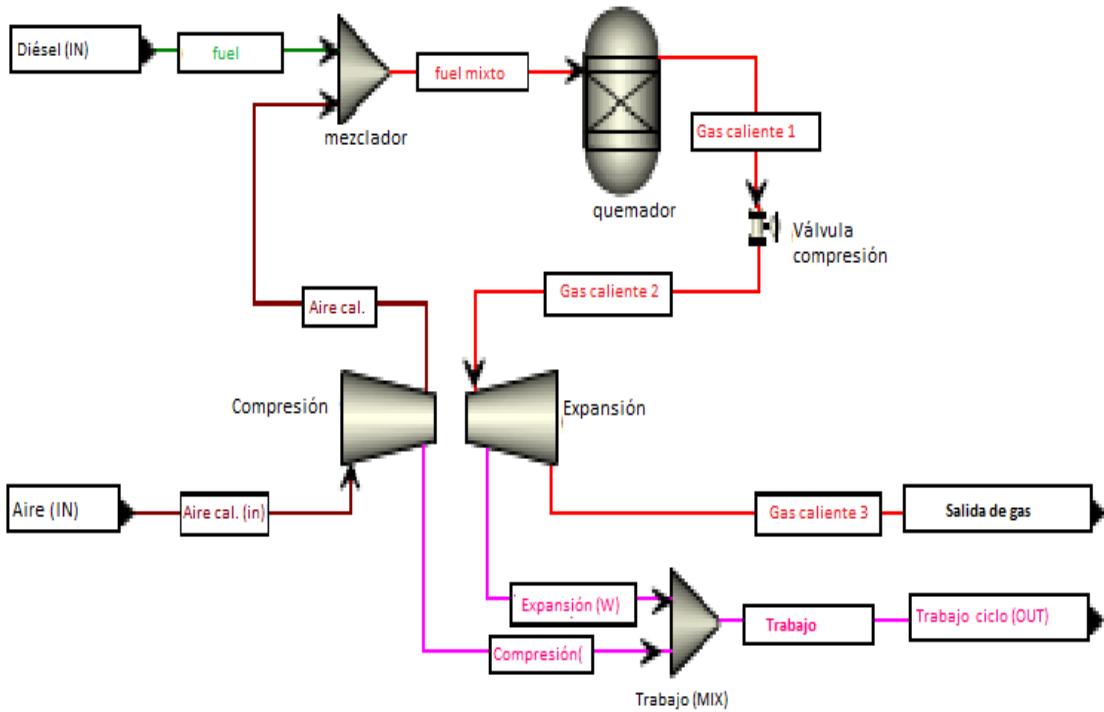


Figura 3.2 Proceso térmico llevado a cabo en el motor (Referencia [12])

En adición a los pistones del motor, este motor diésel tiene un tanque de entrada de aire fresco, sistema de inyección del fuel y también un sistema de refrigeración.

El diagrama del motor diésel se muestra en la Figura 3.3. El aire fresco, en primer lugar pasa por un filtro de limpieza para evitar la entrada partículas que puedan dañar la instalación. Posteriormente, se somete a un proceso de presurización por medio de un turbocompresor. Es enfriado a la temperatura requerida previamente a la inyección en los pistones. En dichos pistones el aire se mezcla con el combustible por medio de la bujía y se presuriza hasta llegar a la temperatura de ignición. El gas de escape caliente descargado de los pistones, será enfriado nuevamente y parte de los gases de combustión se introducen al turbocompresor.

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

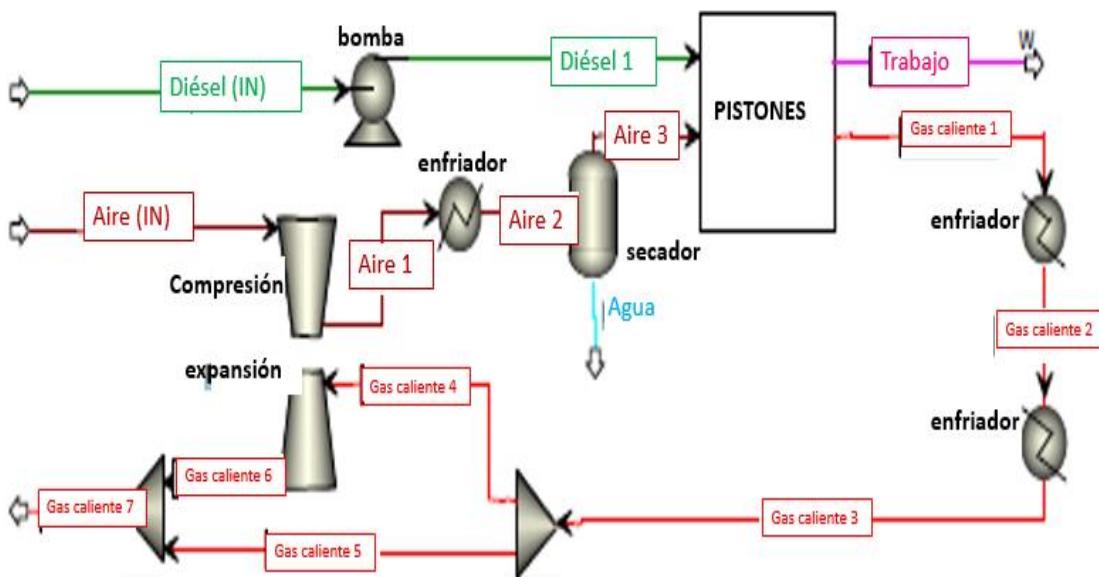


Figura 3.3 Diagrama completo del motor diésel interiormente (Referencia [12])

3.3.2 Sistema energético del barco

El sistema de energía global del barco se representa en la Figura 3.4. Consiste en tres partes principales: sistema de propulsión del motor diésel, sistema de generación de potencia auxiliar y sistema WHR.

Los gases de combustión provenientes del motor diésel pasan por un sistema WHR, para aprovechar las altas temperaturas con las que son expulsados. El sistema WHR tiene como objetivo principal la producción de vapor sobrecalefactado, el cual se expande en una turbina de vapor acoplada a un generador eléctrico, manera muy económica de obtención de electricidad. El intercambiador de temperatura se divide en tres partes: economizador, evaporador y sobrecalefactor. Los gases de combustión irán pasando por cada una de las etapas cediendo calor al circuito.

El vapor descargado de la turbina se condensa y se bombea junto al agua de refrigeración a un tanque de almacenamiento. Esta agua es inicialmente calentada con aire proveniente de un estado de altas temperaturas, obtenido con el calor desprendido por el motor. Este vapor, después se introduce al tambor de agua/vapor. Este proceso se repite una y otra vez de manera cíclica.

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIÓNES DE CO₂

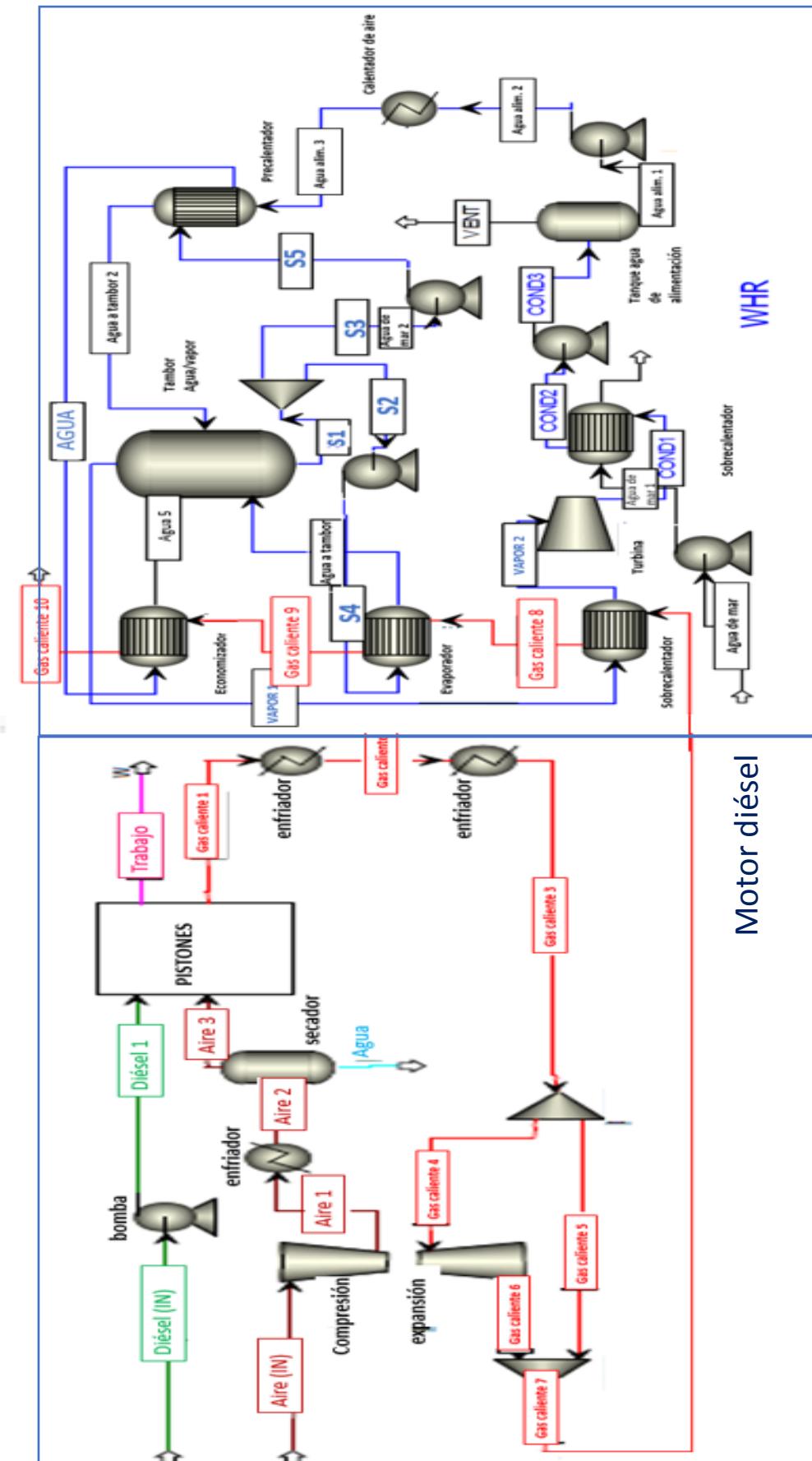


Figura 3.4 Sistema global de energía del barco (Referencia [12])

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

3.3.3 Desarrollo del modelo de captura de CO₂

- *Modelo de captura, compresión y almacenamiento (Capture, Compaction, Storage)*

Para procesos de obtención de energía a partir de la quema de combustibles fósiles, la captura de carbón por absorción es la más desarrollada comercialmente. La tecnología más adecuada para este proceso es el uso de aminas como elemento de absorción de partículas de CO₂. La comercialización del proceso aún no se encuentra muy desarrollada debido al elevado precio que conlleva, ya que es necesario un gran aporte de energía para la disolución del compuesto. Además, su aplicación para la captura del CO₂ proveniente de embarcaciones, supone una serie de desafíos añadidos como las limitaciones de espacio y el constante movimiento de la instalación.

Limitaciones del modelo CCS a bordo:

Características del depósito	Limitaciones del CCS a bordo
A gran distancia de tierra firme	Tanques de almacenamiento de disolvente y CO ₂ capturado
Espacio limitado	Tamaño de los equipos
Capacidad limitada	Requerimiento de calor y electricidad al proceso
Constante movimiento	Limitaciones de construcción (Ej.: altura de columnas)

Tabla 3.2 Limitaciones de CCS en una embarcación

Es fácil de imaginar que son necesarios tanques de almacenamiento, tanto para el disolvente como para el CO₂ capturado. En la utilización de CCS en instalaciones de tierra firme, el CO₂ se presuriza hasta una fase densa para el transporte por tuberías hasta el almacenamiento. Mientras que para el transporte a bordo, el CO₂ capturado es almacenado en fase líquida en tanques, que podrán ser descargados una vez el barco haya alcanzado el puerto. Para el abastecimiento de agua, la marca Kvamsdal presenta un agua en forma disuelta en plataformas de tierra firme para un almacenamiento estable sin necesidad de realizar la separación de componentes. En el proceso de refrigeración, el agua de mar suele ser aceptada como una buena fuente de

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

alimentación. Otra limitación importante es que el tamaño de los equipos del sistema CCS deben minimizarse en tamaño y peso lo máximo posible, teniendo en cuenta que se debe mantener un equilibrio entre la reducción del tamaño de los equipos y el consumo energético en términos de perspectiva de desarrollo económico.

Una consideración especial es la altura de la máquina de absorción y del depósito de decapante, ya que son dos piezas indispensables en el proceso de captura del carbono. La altura de estos equipos es una de las claves a considerar. Cuanto mayor sea la altura, mayor será la eficiencia del proceso de absorción. Estudios previos muestran que para la aplicación del CCS a bordo, la altura normal de la máquina de absorción y del depósito de decapante se encuentra en valores entre 20m y 30,6m. Teniendo en cuenta todas las consideraciones técnicas de la instalación, la altura total podría estar en torno a unos 50 metros. Incluso para embarcaciones de gran longitud, este tipo de dimensiones se aleja de la realidad desde un punto de vista de diseño de un barco.

- *Modelos de compresión de CO₂ y tanques de almacenamiento*

Hay numerosos estudios de transporte de CO₂ por medio de barcos y los resultados muestran que transportarlo en estado líquido es la manera más eficiente para su almacenamiento. Para conseguirlo el depósito refrigerado debe estar a temperaturas desde -6°C para 6 bares, hasta -50°C para 7 bares, valor muy cercano al punto triple del CO₂. Para este proceso, es necesaria una gran capacidad de enfriamiento. Este proceso de semi-refrigeración se lleva a cabo en los depósitos de a bordo o una vez en los puertos. Sin embargo, la capacidad de refrigeración es limitada en una embarcación. En este caso, el CO₂ se pasa a estado líquido por medio de un proceso de compresión. De acuerdo con su diagrama de fases, el punto supercrítico del CO₂ puro es a la presión de 73 bares y a la temperatura de 31°C. Si consideramos el margen de variación de temperaturas y la influencia de las impurezas del gas, la presión necesaria en los depósitos de almacenamiento de CO₂ es de 100 bares. Además, el CO₂ se puede encontrar en fase densa o supercrítica en un amplio abanico de temperaturas.

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

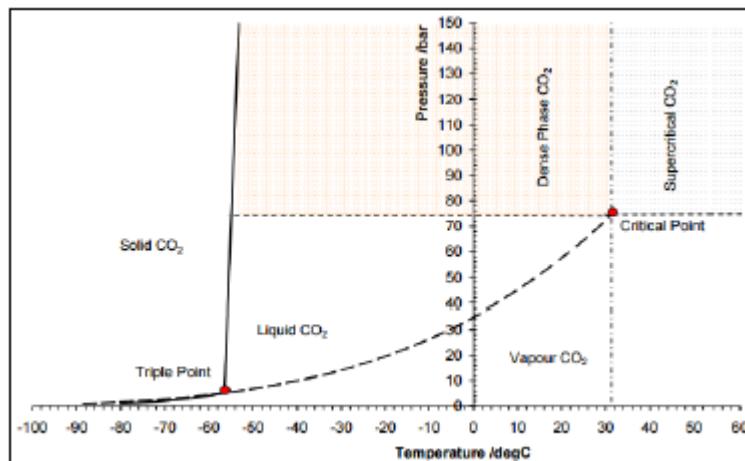


Figura 3.5 Punto supercrítico

El CO₂ capturado sale del regenerador a una presión de 2 bares, por lo que es necesario un proceso de compresión del CO₂ previo al almacenamiento. El proceso de compresión del gas no sólo significa un incremento en el capital de inversión, si no que a su vez requiere un coste en la instalación del equipo y un amplio espacio para las instalaciones

- *Modelo de compresión supersónica*

Un proceso de compresión que se ha desarrollado actualmente para estos casos y que pretende evitar este problema a la hora de inversión de capital inicial, es la tecnología de compresión supersónica de ondas de choque. Desarrollada por RAMGEN Power System y como se ha dicho antes, es específica para la compresión de CO₂. Este proceso solo necesita dos etapas y la reducción en el capital de inversión es en torno al 50 %, además de un menor requerimiento de carbono. La temperatura de descarga del CO₂ comprimido es muy elevada, entre 246°C-285°C debido al amplio margen de presión para cada estado. Permitiendo la oportunidad de integración del calor de compresión con el proceso principal de obtención de energía del barco y captura de CO₂. Sin embargo, es un proceso todavía en desarrollo con muchos detalles aún por definir.

3.3.4 Desarrollo del modelo seleccionado

Los parámetros de compresión del CO₂ para este caso se muestran en la siguiente tabla.

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

Parámetros	Valor
Temperatura de entrada al compresor (°C)	20.0
Número de etapas del compresor	2
Ratio de presión por etapa en el compresor	7.2
Eficiencia isoentrópica del compresor (%)	75
Temperatura de salida de los enfriadores internos del compresor (°C)	20
Caída de presión en los enfriadores internos (bar)	0.05
Presión en el depósito de CO ₂ (bar)	100.0
Temperatura en el depósito de CO ₂ (°C)	20.0

Tabla 3.3 Integración del proceso CCS en el sistema de energía del barco

Para el desarrollo del sistema de energía del barco hemos optado por la captura CCS. La cantidad de consumo de combustible y el tamaño de los depósitos necesarios para almacenar el CO₂, dependen de la distancia y duración del recorrido. Para este caso, tenemos datos de la ruta desde Trieste (Italia) a Estambul (Turquía) que es la que realiza el modelo de barco escogido de manera habitual. La distancia de este trayecto es de 2.075 kilómetros, que equivalen a 58 horas de recorrido a una velocidad de 20 nudos.

Ruta	Trieste (Italia) a Estambul (Turquía)
Distancia (km)	2.075
Tiempo empleado en el recorrido (horas)	58
Porcentaje de carga	85% de la potencia total
Velocidad de la embarcación (nudos)	20

Tabla 3.4 Datos del trayecto realizado por la embarcación

- *Interfaces de integración*

La aplicación del proceso de captura y almacenamiento de CO₂ conlleva una serie de modificaciones a tener en cuenta en nuestra embarcación. Esto incluye:

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

- (1) Conectar los gases de combustión del sistema de energía del barco con el proceso PCC.
- (2) Extraer vapor de baja presión del sistema de energía del barco para proveer calor suficiente para la regeneración del proceso PCC.
- (3) El retorno de condensados desde la caldera de recuperación, proveniente del sistema de captura de carbono, al sistema de energía de la máquina.
- (4) Suministro de energía eléctrica desde el barco al PCC y el proceso de compresión del CO₂.

La aplicación del proceso CCS a bordo tiene como consecuencia una pérdida de potencia de la energía total del sistema. Sin embargo, en el caso del CCS en un barco, la potencia de propulsión y otras necesidades de energía han de mantenerse en los mismos valores para poder asegurar el transporte de mercancías/personas durante el trayecto. Con estas limitaciones, se necesitará una fuente auxiliar de energía para abastecer el exceso energético. Por eso, para intentar plantear un caso coherente, se van a comparar dos opciones de diseño diferentes con respecto al barco sin captura de carbono planteado anteriormente.

3.3.5 Sistema de energía del barco

- *Sistema de energía del barco con proceso de captura de carbono (Caso 1)*

La figura 3.6 muestra el diagrama de bloques del sistema de energía del barco que ha sido definido previamente como caso de referencia. La figura 3.7 presenta el diagrama de bloques del barco referencia con el proceso de captura de carbono integrado, que ha sido definido como caso 1. Como se puede observar, este caso considera que las necesidades energéticas requeridas para la captura del carbono, son suministradas por el propio sistema de abastecimiento de energía del barco. Consultando otros estudios termodinámicos previos, se puede asegurar que el calor requerido para una captura del 90% no puede ser suministrado de este modo con únicamente el calor proveniente del WHR. En este caso, el sistema WHR quedaría totalmente cancelado. Los gases de combustión del motor diésel están directamente relacionados con el regenerador. Después de intercambiar calor con el disolvente, van hacia la unidad de pre-tratamiento del sistema CCS

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

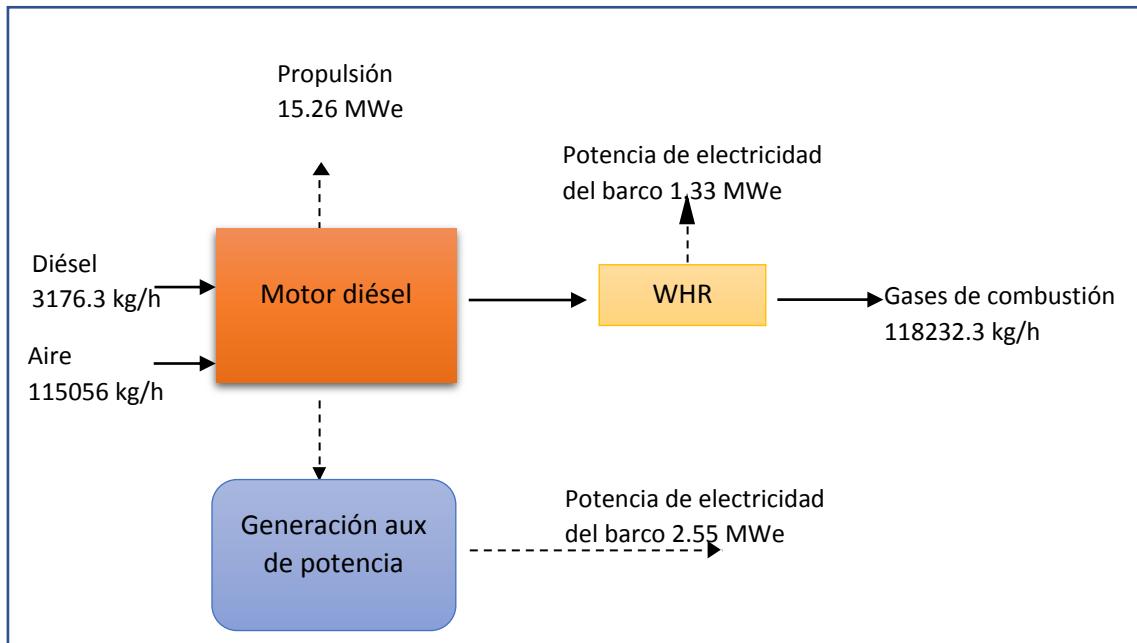


Figura 3.6 Diagrama de bloques del sistema de energía del barco

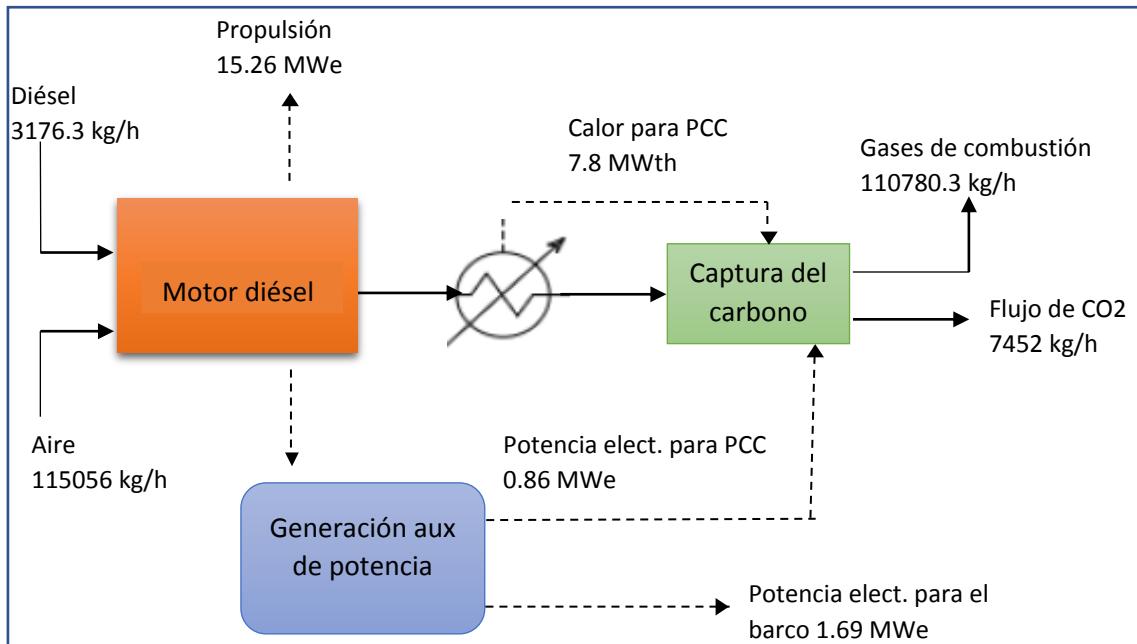


Figura 3.7 Diagrama de bloques del sistema de energía del barco caso 1

- *Sistema de energía del barco con proceso de captura de carbono y adición de una turbina de gas (Caso 2)*

En este caso 2, la adición de la turbina de gas ha sido realizada para aportar tanto electricidad como calor al proceso de captura de carbono. Pudiendo de esta forma alcanzar un nivel del 90%, cuyo proceso puede ser visto en la Figura 3.8. Al igual que en el caso 1, no se usa el sistema WHR del caso de

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

referencia ya que es proporcionado por la turbina de gas. Hay dos consideraciones a tener en cuenta:

- (1) Esto evita la perdida de energía debida a los procesos de conversión que se dan en el caso de referencia con el WHR.
- (2) Hace que la planta de potencia de la turbina de gas se equipare con el sistema de energía del barco a la hora de aportar energía al proceso de captura de carbono y por tanto que la pérdida de potencia de la embarcación sea menor.

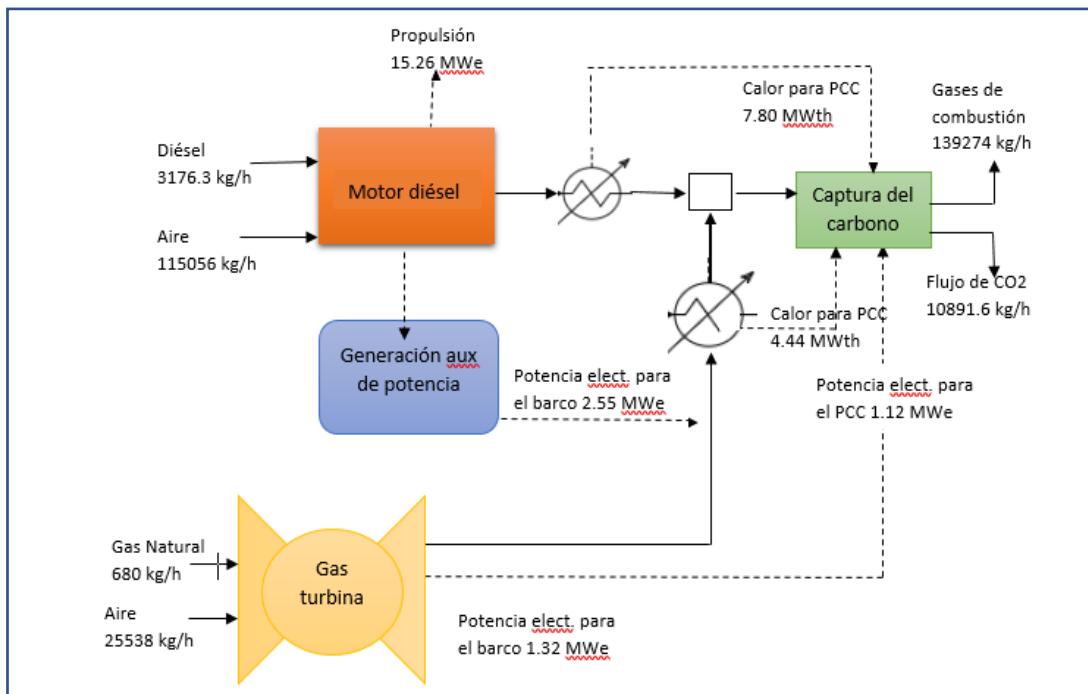


Figura 3.8 Diagrama de bloques del sistema de energía del barco caso 2

El tipo de turbina seleccionado para este proceso es una turbina que puede albergar diferentes combustibles y con una potencia de salida muy superior a la que podría llegar a ser necesaria. Aprovechando la oportunidad de realizar prácticas en el departamento de energía de la factoría Opel España, se ha utilizado un simulador de turbinas de gas disponible en el departamento, con sus respectivas características:

- (1) Primero, poder simular con gas natural la turbina, ya que ha sido el combustible seleccionado para la embarcación desde un inicio y coincide en este caso con el combustible que se usa para la turbina de

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

gas perteneciente al ciclo de cogeneración existente en la fábrica Opel España.

- (2) La turbina en este caso simulada, tiene tamaño para albergar potencias mucho mayores de las necesarias en este caso, pudiendo alcanzar valores por encima de los 10 MWe.
- (3) El uso de este simulador permite obtener datos contrastados con los obtenidos en la turbina real.
- (4) Debido a las grandes dimensiones de esta turbina comparando con la que sería necesaria para la producción de esta potencia, los rendimientos obtenidos no salen favorables, ya que está diseñada para flujos másicos mucho más elevados.

Pese a que se dispondrá de depósitos de diésel para suministro de los motores, se ha optado por el gas natural como en el resto del trabajo por los motivos aportados previamente al inicio del proyecto.

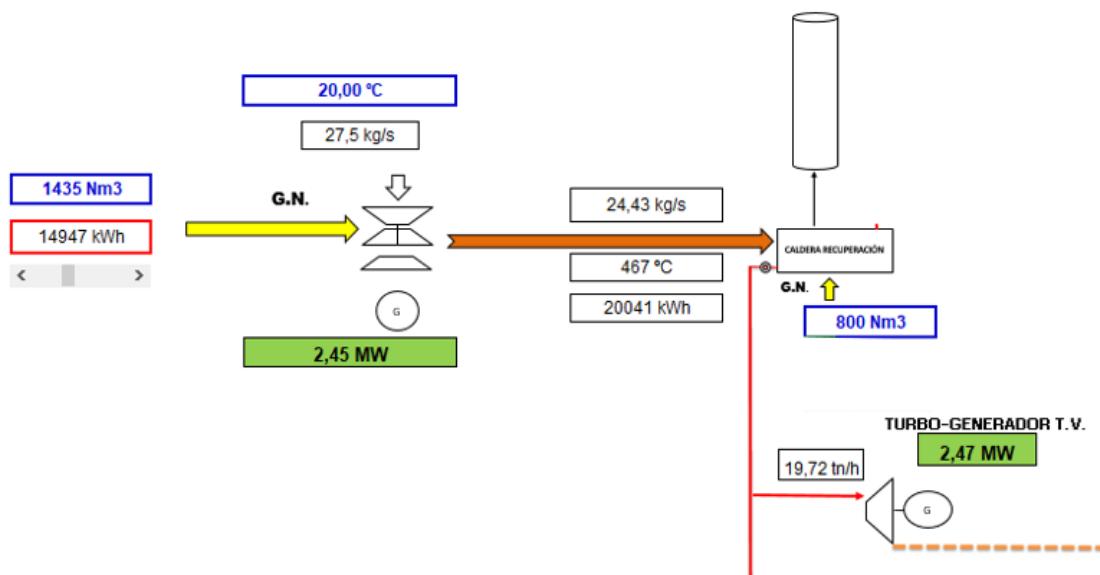


Figura 3.9 Diagrama del cálculo de potencias en el caso 2

La posibilidad que ofrecen los resultados de este simulador es poder ajustar la turbina a nuestro caso y obtener los datos de energía de potencias muy cercanos a la realidad. Incluso poder añadir en la simulación un turbo-generador a partir de una turbina de vapor. Pero las limitaciones de tamaño que conlleva la instalación en el interior de un barco y la inversión económica, han sido los motivos principales por los que se decide que el primer caso es el más

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

adecuado. La instalación de la turbina de gas lleva consigo la introducción de depósitos de combustible y un lugar para su combustión entre otras cosas. El contrapunto principal de la elección del caso del WHR, es que no se alcanza el objetivo de un 90% del CO₂.

Para simular el sistema WHR, se ha llevado a cabo el siguiente ciclo Rankine simulando el de aprovechamiento del aire caliente proveniente de los motores por medio de una caldera de recuperación. Dicho sistema de cogeneración se planteará dos veces. La primera de ellas con el único objetivo de obtención de energía extra, que pese a no ser lo que el sistema WHR realiza, servirá para contrastar el ciclo y ver si los resultados obtenidos con colección de CO₂ son plausibles. Y en el segundo caso ya si que se añade la captura de CO₂ al ciclo de vapor.

4. SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE PROPULSIÓN MARÍTIMA SIN CAPTURA DE CO₂

Antes de ir más lejos en la definición del modelo, se van a mostrar las diferentes suposiciones y aproximaciones generales que se van a llevar a cabo.

- Los equipos que intervienen en el proceso son considerados como cajas negras, de tal modo que no se ha tenido en cuenta la tecnología de cada uno de ellos.
- En los balances de masa, se supone un flujo continuo sin pérdidas de materia.
- Los rendimientos aplicados a algunos de los equipos, excepto al del motor, son aproximados al orden de magnitud que este tipo de maquinaria tiene atribuida.
- Los márgenes de temperatura considerados están establecidos a partir de los de entrada y salida del motor de la embarcación tomada como referencia consultando la documentación correspondiente.

El ciclo Rankine desarrollado es el siguiente:

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

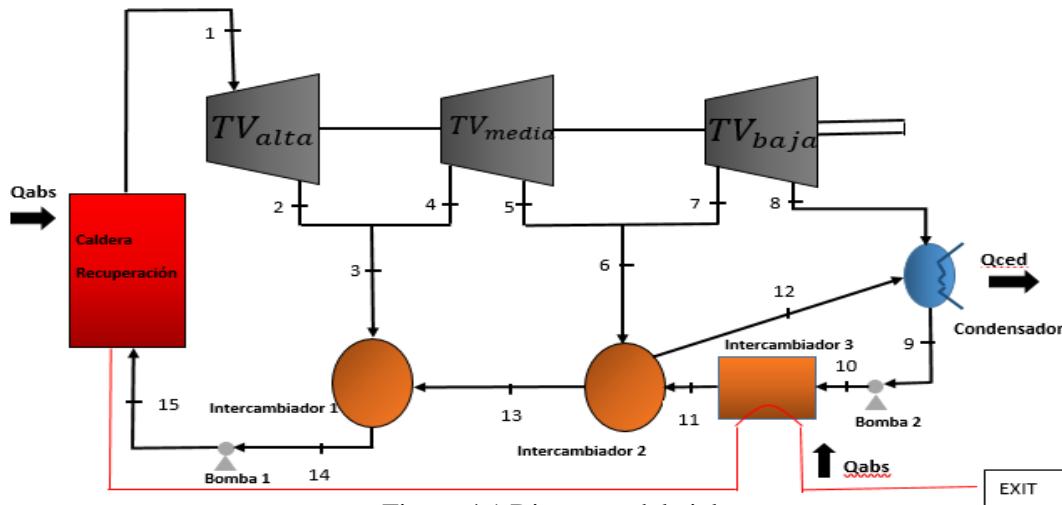


Figura 4.1 Diagrama del ciclo

Como se viene haciendo referencia en varias partes del trabajo, la labor principal de este aparato es la de utilizar el calor residual proveniente de la combustión ejercida en los dos motores de propulsión de la embarcación.

4.1 Caldera de recuperación

En esta caldera se busca obtener vapor de agua a altas presiones para luego más tarde aprovechar este incremento de energía cinética del fluido para hacer mover una turbina de vapor.

A medida que avanzan los gases en el interior de la caldera se van encontrando con tubos por los que circula vapor de agua más frío a los que cede temperatura. Estos tubos, a su vez, se encuentran rodeados por infinidad de aletas para aumentar la transmisión de calor tanto de conducción como en convección, principalmente motivado por el aumento en la superficie de contacto. Este vapor de agua circulante en los tubos va desde presiones más bajas en el tramo final de la caldera, correspondiente al evaporador de baja presión donde el aire de motores ya ha perdido bastante poder calorífico, a la parte delantera del recalentador, donde ya lleva casi todo el recorrido y ha sido capaz de alcanzar una alta temperatura y presión. Este vapor de agua del inicio de la caldera va a ser finalmente el que se utilice para la entrada a la primera de las turbinas de nuestro ciclo de vapor.

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

4.2 Turbinas

El proceso llevado a cabo en el interior de cada una de las turbinas va a ser el mismo ya sea de alta, media o baja presión. Con la diferencia de que la energía obtenida será menor cuanto menos sea la presión de entrada.

El proceso consiste en una expansión en la que la presión del fluido se reduce para producir trabajo; es decir, las turbinas son máquinas que desarrollan par y potencia en el eje como resultado de la variación de la cantidad de movimiento del fluido que pasa a través de ellas.

Las ecuaciones representan balances de conservación de masa y energía respectivamente. Despreciando el calor transferido al ambiente, los balances de masa y energía en términos de potencia para el volumen de control de la turbina, se reducen en estado estacionario a

$$0 = \cancel{Q_{vc}} - \dot{W}_t + \dot{m} \left[h_1 - h_2 + \frac{C_1^2 - C_2^2}{2} + g(z_1 - z_2) \right]$$

o bien

$$\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}} = h_1 - h_2$$

donde \dot{m} es el flujo másico del fluido de trabajo y \dot{W}_t/\dot{m} es el trabajo desarrollado por unidad de masa que circula por la turbina. Como ya se ha dicho, los efectos de las energías cinética y potencial se desprecian.

Todo ello considerando que la turbina es adiabática y sin ninguna disipación de la energía disponible debido a la fricción, estrangulamiento, etc. (es decir, reversible). Un proceso reversible y adiabático es isoentrópico (entropía constante).

Debido a las irreversibilidades de una auténtica turbina, la transferencia real de trabajo será menor que en la ideal y, por lo tanto, la entalpía específica de salida será mayor que la h_2' . Motivo por el cual a la hora de los cálculos se ha de tener en cuenta un rendimiento isoentrópico.

Para comenzar el análisis fijamos los estados, empezando por la entrada a la turbina con una presión de 25 bar y la temperatura de 300 °C. Entonces los datos obtenidos son:

$$h_1 = 6008 \text{ kJ/kg} \quad \text{y} \quad s_1 = 6,642 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}.$$

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

El estado 2 queda determinado por $p_2 = 10$ bar y por el hecho de que la entropía específica es constante para la expansión adiabática e internamente reversible a través de la turbina. Usando los datos del líquido y vapor saturado del agua, el título de estado 2 es

$$x_2 = \frac{s_2 - s_f}{s_g - s_f} = 1$$

el título de valor unitario nos indica que es vapor saturado.

La entalpía isoentrópica se calcula como

$$h_{2s} = h_f + x_2 \cdot h_{fg} = 2855 \text{ kJ/kg}$$

La entalpía específica del estado 2 se determina utilizando el rendimiento de la segunda etapa de la turbina

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}}$$

Conociendo el valor de dicho rendimiento, que hemos tomado $\eta_t = 0,75$ (dato obtenido del catálogo otorgado por el fabricante), podemos despejar el valor de h_2 y queda

$$h_2 = 2855 \text{ kJ/kg}$$

Una vez conocida esta entalpía calculamos la entropía en función de la temperatura y la entalpía

$$s_2(p_2, h_2) = 6,75 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$$

También calculamos el valor de la temperatura en el estado 2 para ir controlando los valores en los que se encuentra el ciclo porque nos puede servir de ayuda a la hora de cálculos en los siguientes estados.

$$T(p_2, h_2) = 211,5^\circ\text{C}$$

Una vez conocido el funcionamiento de una turbina de vapor se aplican las mismas ecuaciones a las otras turbinas de media y baja presión. Los aportes de potencia de cada máquina serán menores a medida que la presión sea menor y menor es la fuerza que el vapor ejerce sobre los álabes de la turbina, por tanto, el eje gira a menos revoluciones y menores son los kW generados.

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

Pero antes de estos cálculos más generales, se debe tener en cuenta que previamente a las turbinas de media y de baja presión hay una división del caudal másico.

Conociendo los valores del estado 2 sabemos los valores del estado 3 y del estado 4 de temperatura (T_3, T_4), presión (p_3, p_4), entalpía (h_3, h_4) y entropía (s_3, s_4).

El flujo másico de vapor proveniente de la turbina de media volverá a dividirse antes de la turbina de baja entre el intercambiador 2 y la turbina de baja.

Al igual que en el caso anterior a partir del estado 5 sabremos temperaturas (T_6, T_7), presiones (p_6, p_7), entalpías (h_6, h_7) y entropías (s_6, s_7). El estado 5 se obtendría del mismo modo que hemos obtenido el 2 solo que en este caso la presión fijada sería de 10 bares.

Las ecuaciones de flujo másico se van a ir planteando a medida que aparezcan bifurcaciones en el caudal del agua y al acabar de definir el ciclo completo se deberá cumplir que tengamos suficientes ecuaciones como para poder calcular el flujo másico que circula por cada uno de los equipos.

A continuación, se representa en una tabla, los valores obtenidos para cada una de las turbinas:

	TEMPERATURA	PRESIÓN	ENTROPÍA	ENTALPÍA	TÍTULO
	(°C)	(bar)	(kJ/kg·K)	(kJ/kg)	(X _i)
ESTADO 2	192,7	8	6,77	2822	1
ESTADO 3	192,7	8	6,77	2822	-
ESTADO 4	192,7	8	6,77	2822	-
ESTADO 5	154	5	6,83	2754	1
ESTADO 6	154	5	6,83	2754	-
ESTADO 7	154	5	6,83	2754	-
ESTADO 8	39,01	0,07	7,44	2311	0,89

Tabla 4.1 Representación de estados del 1 a 8

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

4.3 Condensador

Un condensador es un intercambiador térmico, donde se pretende que el fluido que lo recorre, cambie a fase líquida desde su fase gaseosa mediante el intercambio de calor (cesión de calor al exterior, que se pierde sin posibilidad de aprovechamiento) con otro medio.

En el condensador se transfiere el calor del vapor al agua de recirculación que circula en un flujo separado. El vapor condensa y la temperatura del agua de refrigeración aumenta. En estado estacionario, los balances de masa y energía para el volumen de control que incluye el lado de condensación del intercambiador de calor nos dan

$$\frac{\dot{Q}_s}{\dot{m}} = h_1 - h_2$$

donde \dot{Q}_s/\dot{m} es la energía transferida en forma de calor desde el fluido de trabajo al agua de refrigeración, por unidad de masa del fluido de trabajo que atraviesa el condensador.

Las razones para condensar el vapor son tres:

- Se aprovecha el vapor a la salida de la turbina, cerrando el ciclo del agua.
- Se reduce la presión a la salida, incluso por debajo de la atmosférica, con lo que el salto de presión es mayor y por lo tanto el rendimiento y la potencia de la turbina aumentan.
- El posterior aumento de presión del fluido puede realizarse en una bomba hidráulica, con un consumo energético menor que si se realiza en una caldera o en un compresor.

Para los estados termodinámicos, partimos del conocimiento de las propiedades en el estado 8 de entrada. Usando los datos de líquido y vapor se calcula el título:

$$x_8 = \frac{s_8 - s_f}{s_g - s_f} = 0,89$$

Conociendo este dato, se sabe que a la entrada no será todo vapor saturado, si no que el punto se encuentra dentro del domo y también tiene una fracción líquida.

La entalpía isoentrópica queda:

$$h_{8s} = h_f + x_8 \cdot h_{fg} = 2310 \text{ kJ/kg}$$

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

Hay que destacar que el estado 12, aunque no entremos ahora en detalles de cómo se ha obtenido, tendrá la misma presión que los otros dos estados 8 y 9.

El estado 9, de salida del condensador, es líquido saturado ($x_9 = 1$) a la misma presión que los estados de entrada, $p_9 = 0,07$ bar.

Con estos dos valores ya podemos calcular el resto de propiedades necesarias.

$$h_9(p_9, x_9) = 163,4 \text{ kJ/kg}$$

$$s_9(p_9, x_9) = 0,559 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$$

$$T_9(p_9, x_9) = 39 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

4.4 Bomba 2

El líquido procedente del condensador en el estado 9 es bombeado desde la presión del condensador hasta la presión de entrada al intercambiador 3. Considerando un volumen de control que rodee la bomba y suponiendo que no hay transferencia de calor con el ambiente, los balances de masa y energía nos dan

$$\frac{\dot{W}_b}{\dot{m}} = h_{10} - h_9$$

donde \dot{W}_b/\dot{m} es el trabajo consumido por unidad de masa que circula a través de la bomba. Esta energía transferida es positiva de entrada a la bomba. Cabe destacar que para el caso de las bombas el rendimiento tomado es de 1.

El estado 10 queda determinado por la presión del intercambiador 3 que es igual a la presión del estado 3 ($p_3 = 10$ bares) y la entropía específica $s_{10} = s_9$. En principio, la entalpía específica de h_{10} se calcularía por medio de las propiedades de líquido subenfriado. Como los datos de líquido subenfriado son relativamente escasos, hay otro método: la manera teórica más conveniente para despejar h_{10} sería a partir de la ecuación de la potencia expresada anteriormente. Dado que el volumen específico del líquido varía normalmente muy poco entre la entrada y la salida de la bomba, una aproximación se obtiene tomando el volumen específico a la entrada de la bomba v_9 , como constante en el proceso. Entonces:

$$\left(\frac{\dot{W}_b}{\dot{m}} \right)_{rev}^{int} \approx v_9(p_{10} - p_9)$$

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

Sin embargo, al tener la posibilidad de usar una simulación, se ha optado por la situación más sencilla y se ha hecho aproximándolo por líquido subenfriado.

Se introducen los datos de entropía y presión y ya obtenemos el punto.

$$s_{10} = s_9 = 0,559 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$$

y a partir de este valor

$$h_{10}(p_{10}, s_{10}) = 164,4 \text{ kJ/kg}$$

$$T_{10}(p_{10}, s_{10}) = 39 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

4.5 Intercambiadores

El ciclo posee tres intercambiadores diferentes que vamos a ir abordando conforme al orden de los estados. Uno de ellos sería intercambiadores de calor de contacto directo y los otros son intercambiadores cerrados, del tipo carcasa y tubos. Se comienza con los intercambiadores cerrados y ya posteriormente se abordará el intercambiador abierto correspondiente al intercambiador 1.

En el intercambiador cerrado el agua aumenta su temperatura debido a que los gases de salida del motor extraídos de la caldera de recuperación son recirculados y parte son condensados en el exterior de los tubos. Por dentro de los tubos circula el agua de alimentación a menor temperatura. Como no hay mezcla entre las dos corrientes sus presiones pueden ser distintas. La temperatura del agua de alimentación crece a su paso por el calentador y sale en el estado 11.

Aunque el calentador cerrado que se muestra en la figura no tiene pérdidas de presión en sus flujos, hay una fuente de irreversibilidad debido a la diferencia de temperatura entre sus dos corrientes.

Para obtener el flujo de gases de combustión se ha consultado en el catálogo de los motores seleccionados la cantidad de gases que salen del motor por unidad de tiempo. A partir de ahí, una vez conocido ese valor, consiste en determinar cantidad de esos gases que es reutilizada para aumentar la temperatura en este punto.

Es importante este valor, ya que si no se alcanza una temperatura adecuada a la salida de este intercambiador, el flujo del estado 6 se reduce mucho y entonces con ello baja el rendimiento del ciclo.

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

Ahora se determina a que entalpía vienen los gases provenientes de la caldera. De la caldera de recuperación se sabe tanto la temperatura (T_{cald}) como la presión (p_{15}). La presión es un dato de partida del problema

$$p_{15} = p_1 = 15 \text{ bares}$$

pero de cara a la obtención de la temperatura de los gases de la caldera, habrá que hacer un balance de energía entre la entrada y la salida para obtener su valor. De tal modo que

$$Q_{cald} = m_1(h_1 - h_{15})$$

y sabiendo que el calor de los gases es igual al de la caldera nos queda

$$Q_{cald} = Q_{cald} = m_{gases} \cdot C_{p\,aire} (T_1 - T_{cald}) \cdot 2$$

Despejando

$$T_{cald} = 190 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Por lo que la entalpía es

$$h_{gases}(p_{15}, T_{cald}) = 808,2 \text{ kJ/kg}$$

A su vez se define el valor final con el que saldrán los gases una vez se haya producido el intercambio de calor necesario. Esta temperatura es un dato de diseño que viene fijado, como ya se ha citado antes, por el caudal de gases aportado.

$$h_{gases,salida}(p_{15}, T_{gases\,salida} = 110 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 463,1 \text{ kJ/kg}$$

Con todos estos datos definidos, lo que queda es plantear el balance de masa correspondiente para obtener el valor de la entalpía a la salida.

$$m_{10}(h_{11} - h_{10}) = m_{gases}(h_{gases,salida} - h_{gases})$$

Ecuación de la que se obtiene el valor de la entalpía de salida del intercambiador 3

$$h_{11} = 3695 \text{ kJ/kg}$$

que como se puede observar ha incrementado su valor cuantitativamente respecto al estado anterior.

El siguiente intercambiador es el intercambiador 2. Vuelve a tratarse de un intercambiador cerrado en el que por una parte circula vapor y por la otra el líquido.

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

En este caso se ha llevado a cabo una hipótesis en la que se han plantado los saltos de temperatura que queríamos para el circuito y en función de ello se diseña el intercambiador. En la Figura 4.10 se observa la evolución de temperaturas de los dos flujos

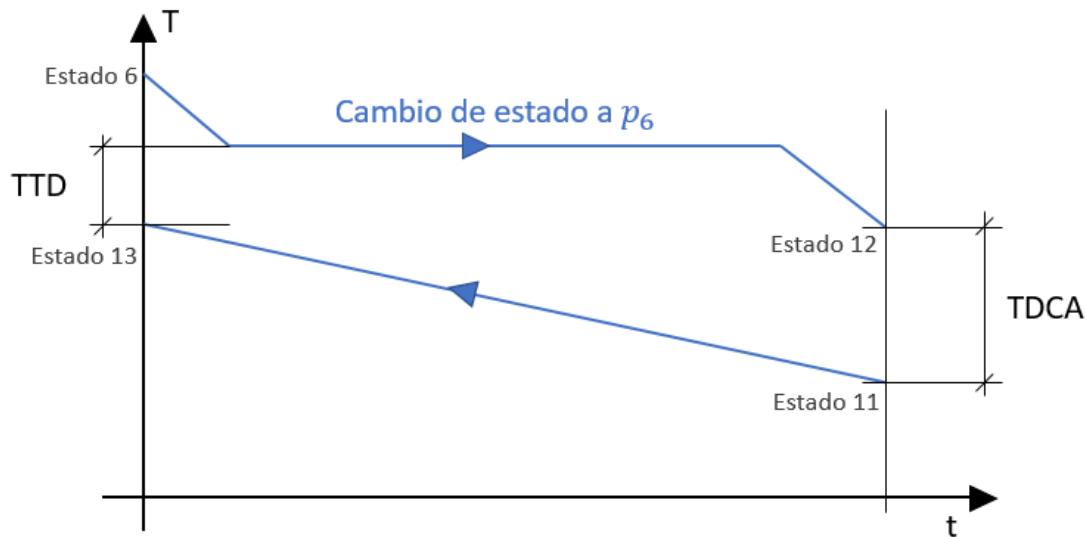


Figura 4.2 Comportamiento de temperaturas en el interior del intercambiador

$TDCA > 0$ $TTD > 0$	$TDCA = 3^{\circ}\text{C}$ $TTD = 3^{\circ}\text{C}$	}
HIPÓTESIS		

A partir de esta hipótesis se pueden plantear distintas ecuaciones para deducir las entalpías correspondientes a los estados que nos faltan:

$$T_{12} = T_{11} + TCA$$

$$T_{13} = T_{sat}(p_6) + TTD$$

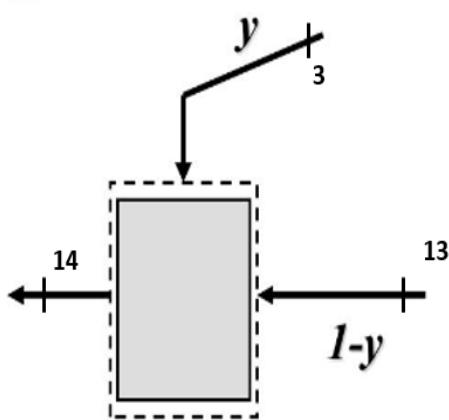
Como última ecuación para este intercambiador, planteamos el balance de masa:

$$m_5(h_6 - h_{12}) = m_{11}(h_{13} - h_{11})$$

Para la obtención de los resultados finales serán necesarias las ecuaciones provenientes del intercambiador 1 explicado a continuación.

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

El último intercambiador corresponde al nº1 que es un intercambiador de calor de contacto directo, en el cual las corrientes a diferente temperatura se mezclan para dar una corriente a temperatura intermedia. Los flujos de mezcla del calentador del agua de alimentación son elegidos de tal manera que la corriente de salida se obtenga vapor saturado a la presión de extracción. El flujo másico del intercambiador viene definido por:



$$\dot{m}_{14} = \dot{m}_3 + \dot{m}_{13}$$

Dividiendo por \dot{m}_{14} se expresa este balance por la unidad de masa de salida que es igual a la total

$$\frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_{14}} + \frac{\dot{m}_{13}}{\dot{m}_{14}} = 1$$

Denotando por y ($y = \dot{m}_3/\dot{m}_{14}$) a la fracción de masa extraída en el estado 3, la fracción del flujo total que atraviesa el estado 13 es

Figura 4.3 Flujo másico intercambiador mixto.

$$\underline{\underline{m}_{13}} = 1 - y$$

Esta es una manera muy común de expresar la distribución de masas en los casos en los que los flujos se mezclan. La fracción y se puede determinar aplicando los principios de conservación de la masa y la energía al volumen de control. Suponiendo que no hay transferencia de calor entre el calentador y su entorno y despreciando los efectos de las energías cinética y potencial, los balances de masa y energía para la situación estacionaria son

$$0 = yh_3 + (1 - y)h_{13} - h_{14}$$

Despejando tendremos

$$y = \frac{h_{14} - h_{13}}{h_3 - h_{13}}$$

ecuación que nos proporcionará el valor de y una vez conocidos los estados 3, 13 y 14.

4.6 Bomba 1

El método de funcionamiento de una bomba hidráulica ya ha sido detallado con anterioridad. Se continua con el cálculo por aproximación a líquido subenfriado.

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

Además se conoce el valor de la presión a la salida de la bomba que ha de ser el mismo al de la caldera (p_1).

$$s_{15} = s_{14} = 1,861 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$$

$$p_{15} = p_1 = 25 \text{ bares}$$

y a partir de este valor

$$h_{15}(p_{15}, s_{15}) = 642,6 \text{ kJ/kg}$$

$$T_{15}(p_{15}, s_{15}) = 39 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

4.7 Cálculos globales del ciclo

Una vez definidos los sistemas que componen el ciclo, queda una definición del conjunto. Primero se calculan los trabajos realizados por cada uno de los elementos, ya sean aquellos que aporten potencia o la consuman. Las ecuaciones de obtención de trabajo de cada uno de los sistemas fueron definidas en la explicación individual. Juntándolas en una y haciendo el balance de energía correspondiente, se obtiene la potencia neta del ciclo.

$$W_{neta \ del \ ciclo} = W_{Turb1} + W_{Turb2} + W_{Turb3} - W_{bomb1} - W_{bomb2}$$

El trabajo neto producido, se obtiene una vez conocido tanto el calor absorbido como el cedido, que se calculan por medio de balances de energía a que interactúan con el exterior y no son planteados como adiabáticos.

$$Q_{abs} = m_{10}(h_{11} - h_{10}) + m_1(h_1 - h_{15})$$

$$Q_{ced} = m_9(h_8 + h_{12} - h_9)$$

Y el rendimiento quedaría

$$\eta_{ciclo} = \frac{W_{neta \ del \ ciclo}}{Q_{abs}}$$

Con este conjunto de datos más globales, se pueden sacar conclusiones sobre el comportamiento del ciclo de vapor planteado.

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIÓNES DE CO₂

5. SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE PROPULSIÓN MARÍTIMA CON CAPTURA DE CO₂.

La captura de CO_2 en postcombustión tiene como protagonista los procesos de absorción química de los gases de combustión. Se trata una tecnología extensamente utilizada en otras industrias y cuyo mayor reto es el adaptarse a las condiciones del proyecto, con espacio para la instalación muy reducido y donde el movimiento es constante. Entre los mayores problemas que se han de superar para su aplicación se encuentra su degradación, los problemas de corrosión que acarrean los solventes ricos en CO_2 y la enorme energía de regeneración necesaria para recuperar el solvente.

La absorción química es el proceso más maduro. Se ha venido utilizando para diversas aplicaciones industriales y, en su aplicación para la captura de CO_2 , se halla en un estado de desarrollo más avanzado que el resto de tecnologías. Las principales ventajas que destacan a la absorción química frente a otros procesos son, la alta eficiencia de captura y la alta selectividad del CO_2 a bajas presiones parciales del mismo. Estas son las razones por las que se ha decantado por la absorción química usando como solvente principal las aminas.

Este segundo ciclo propuesto a continuación, está basado en los mismos principios que el anterior, pero con las modificaciones pertinentes para introducir el sistema de separación de CO_2 .

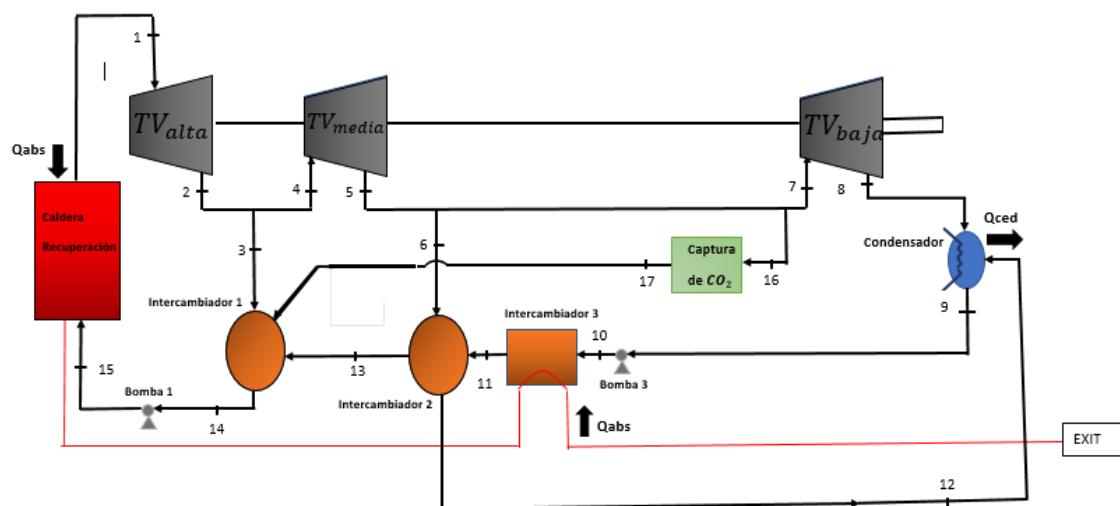


Figura 5.1. Diagrama del ciclo con captura del CO_2

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

Como se observa en la figura 5.1 la distribución de equipos es muy similar con respecto al ciclo anterior. Las diferencias producidas afectan principalmente a los intercambiadores de calor, que cambian algunas de las entradas y salidas (se añade una desviación para la captura de CO₂) y a las propiedades termodinámicas de los estados.

En cuanto a componentes, el cambio que se incluye es el proceso de separación de CO₂, añadir una línea de alimentación de vapor nueva que llegue al lugar donde se encuentra la separación del CO₂.

La captura de CO₂ a efectos prácticos para el ciclo, va a ser considerada como un intercambiador de calor donde el fluido entra en unas determinadas condiciones de presión y temperatura y sale en forma de vapor saturado. Todo lo que sería el proceso de captura y almacenamiento del CO₂ no influye para nada en el circuito del agua, ya que son circuitos totalmente separados. Eso sí, el proceso de absorción química mediante aminas requiere gran cantidad de calor para la regeneración del disolvente, razón por la que el agua en ese punto debe estar a unas temperaturas bastante elevadas. De este modo aseguramos que se aporta el calor necesario para la disolución.

Centrando la atención de nuevo en el ciclo, las condiciones de partida serán las mismas y todas aquellas aproximaciones e hipótesis que han sido tomadas en el anterior caso para resolver las ecuaciones, se tendrán de nuevo en cuenta a la hora de la simulación.

Ahora, siendo que el método de cálculo utilizado ha sido el mismo para ambos casos, solo se va a detallar la parte correspondiente al proceso de separación de CO₂.

5.1 Captura de CO₂

Este apartado es completamente nuevo con respecto al otro ciclo. La desviación de agua hecha entre los estados 6 y 7 sirve para alimentar con vapor de agua caliente el colector de CO₂ y de esta manera, como se ha explicado previamente, aportar el calor necesario para el proceso de captura. A la hora de abordar las ecuaciones del colector se ha de tener en cuenta: (1) los valores de entrada de presión y temperatura van a ser los mismos que los del estado 5. (2) En la salida del colector, el agua va a tener el título con valor de uno ($x_{17} = 1$) lo que significa que es líquido subenfriado. (3) A la

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

salida, la presión es la misma que a la entrada ya, que al considerarlo como un intercambiador de calor no se consideran pérdidas de carga.



Figura 5.2 Flujo másico captura de CO₂

Una última cosa que hay que tener muy en cuenta es que, al añadir un nuevo ramal al ciclo, se añade una nueva incógnita que es su flujo de masa. Por ello, para poder resolverlo hay que añadir una ecuación más con respecto al ciclo anterior. Esta ecuación se obtiene a partir del calor demandado por el proceso de captura de CO₂. Investigando se ha obtenido el calor que las aminas necesitan para poder capturar el CO₂.

$$q_{colección\ CO_2} = 2000 \text{ kJ/kg CO}_2$$

$$q_{colección\ CO_2} = m_{16}(h_{16} - h_{17})$$

5.2 Comparativa de resultados obtenidos en ambos casos

En este apartado se compara el resultado numérico obtenido para cada uno de los ciclos. Los datos que más información aportan a nivel global son las potencias y los rendimientos. Con estos datos, se pretende detallar el comportamiento del ciclo sin absorción y del ciclo con absorción de CO₂. Una vez contrastados los resultados, se puede determinar si el ciclo de vapor para cada uno de los casos será eficiente o no.

Se plantean tres tablas con la misma distribución, con la diferencia entre ellas de que se establecen para distintos niveles de carga de combustible, con lo que variará la cantidad de gases provenientes de los motores y la temperatura a la que salen. De este modo se puede averiguar a qué niveles es más conveniente trabajar para la embarcación y cómo influye el añadir un ciclo de vapor al comportamiento global.

Para el primero de los casos consideraremos que se encuentra completamente lleno y según los datos del fabricante la temperatura de salida de los gases de los motores está a 373 °C.

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

100% Carga	Ciclo de Vapor	Ciclo de Vapor con absorción de CO ₂
$W_{motor}(kW)$	16800	16800
$W_{ciclo}(kW)$	1619	1230
$W_{total}(kW)$	18419	18030
$\eta_{motor}(\%)$	33	33
$\eta_{ciclo}(\%)$	24,9	19,85
$\eta_{global}(\%)$	36,18	35,42

6. Tabla 5.1 Tabla de resultados con carga del 100%

Para el segundo de los casos la cantidad de combustible en los depósitos sería del 85% y la temperatura de los gases de salida del motor de 320 °C.

85% Carga	Ciclo de Vapor	Ciclo de Vapor con absorción de CO ₂
$W_{motor}(kW)$	16800	16800
$W_{ciclo}(kW)$	1282	949.4
$W_{total}(kW)$	18082	17749.40
$\eta_{motor}(\%)$	33	33
$\eta_{ciclo}(\%)$	25.2	18.66
$\eta_{global}(\%)$	35.52	34.86

Tabla 5.2 Tabla de resultados con carga del 85%

En el tercer y último caso el nivel de los depósitos se encuentra al 75% y la temperatura de salida pese a que resulte curioso es más elevada y es de unos 332 °C

75% Carga	Ciclo de Vapor	Ciclo de Vapor con absorción de CO ₂
$W_{motor}(kW)$	16800	16800
$W_{ciclo}(kW)$	1224	933.3
$W_{total}(kW)$	18024	17777.30
$\eta_{motor}(\%)$	33	33
$\eta_{ciclo}(\%)$	25.01	18.59
$\eta_{global}(\%)$	35.40	34.83

Tabla 5.3 Tabla de resultados con carga del 70%

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

Pese a que no aparece en las tablas, se ha de destacar uno de los resultados obtenidos en los flujos básicos del caso con captura de CO₂ al 85% y 75% de carga. Este valor, se hace casi cero en la división de caudal posterior a la turbina de media hacia el intercambiador 2. Correspondiente a los estados 6 y 12. Por lo que en estos casos el conducto sería prácticamente innecesario.

Se ha de comentar también que el flujo ha sido diseñado de tal manera que la captura de CO₂ que se obtiene es de 2 kg/s. Lo que es equivalente a 2000 kW/kg de calor que se ha de aportar para que la amina separe el CO₂ del resto de gases.

Una vez establecidos estos principios, se comparan los datos tabulados previamente. Se puede observar, cómo era de esperar, que el ciclo sin captura de CO₂ posee un rendimiento de entorno al 5% superior con respecto al de captura. A su vez, la potencia generada por el ciclo disminuye del orden de entre 300kW – 400 kW dependiendo de la carga, en cuanto a lo que es el rendimiento global, en conjunto entre el del ciclo con el de los motores. Se logra aprovechar esa potencia aportada por las tres turbinas consiguiendo para el mejor de los casos un rendimiento del 36%, lo que sube un poco el rendimiento que aportaría el motor de forma individual que sería del 33%.

Y en cuanto a que niveles de carga se obtiene un mejor comportamiento del ciclo, los resultados indican que tanto en rendimiento como en potencia el ciclo de vapor tendría unos valores más altos a la máxima capacidad.

7. MOTOR Y CONSUMO

En este apartado se trata de representar el comportamiento de los motores y la captura de CO₂ para diferentes condiciones dadas.

El punto de partida es el conocimiento del motor. Como ya se ha comentado antes, se trata del modelo *Engine Wärtsilä 46F* y dentro de las diferentes posibilidades que ofrece la casa es el 9L46F con una potencia total para los dos motores de 16800 kW.

El punto de partida va a determinar la curva potencia-rendimiento del motor. El comportamiento de un motor de barco no difiere en gran medida con el de otros sectores en cuanto a diseño. Sólo que en este caso la potencia necesaria a aportar es mucho mayor. Por lo tanto, el punto de partida será a partir del comportamiento de un motor estándar:

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

CARGA	POTENCIA	RENDIMIENTO
100%	16800	33%
85%	14200	34%
60%	10080	32%

Tabla 6.1 Comportamiento de los motores 9L36F

Con esta tabla de datos se hace una gráfica, representando el rendimiento frente a la carga del motor:

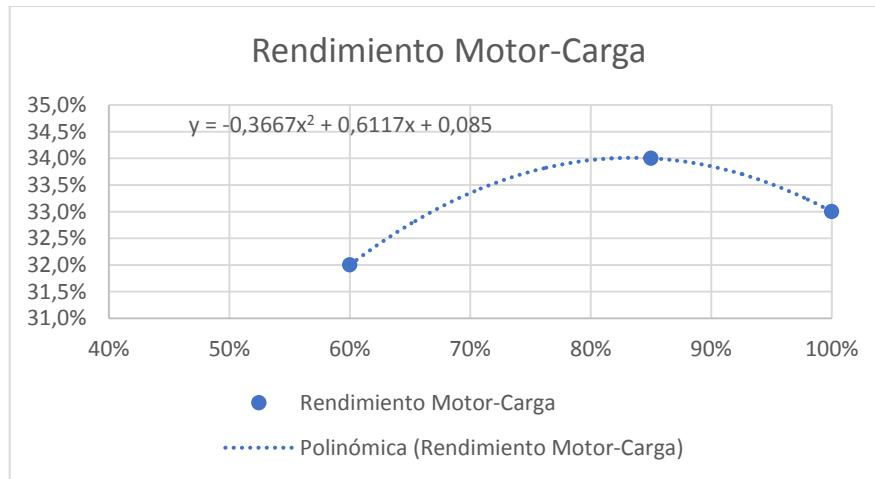


Figura 6.1 Curva comportamiento de motores 9L36F

Esta gráfica lo que permite es definir la ecuación de comportamiento del rendimiento para distintas cargas:

$$y = -0,3667x^2 + 0,6117x + 0,085$$

a partir de la ecuación, se definen los parámetros para un rango de carga que va desde el 0% al 100%. Se observa que es de forma cuadrática y que los valores máximos de rendimiento se establecen en cargas entre el 80%-90%. Para valores fuera de este rango el valor del rendimiento baja considerablemente.

Una vez calculadas las potencias a partir del rendimiento para el porcentaje en carga, se va a proceder al cálculo de cantidad de fuel consumido por el motor en cada caso. La manera de obtenerlo es como muestra la fórmula, por el cociente entre potencia y rendimiento que es igual a la cantidad de fuel consumido. Este, se calcula para todo el rango de potencias. A mayor potencia requerida mayor será el consumo de combustible.

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

$$Fuel [kW] = \frac{Potencia [kW]}{Rendimiento}$$

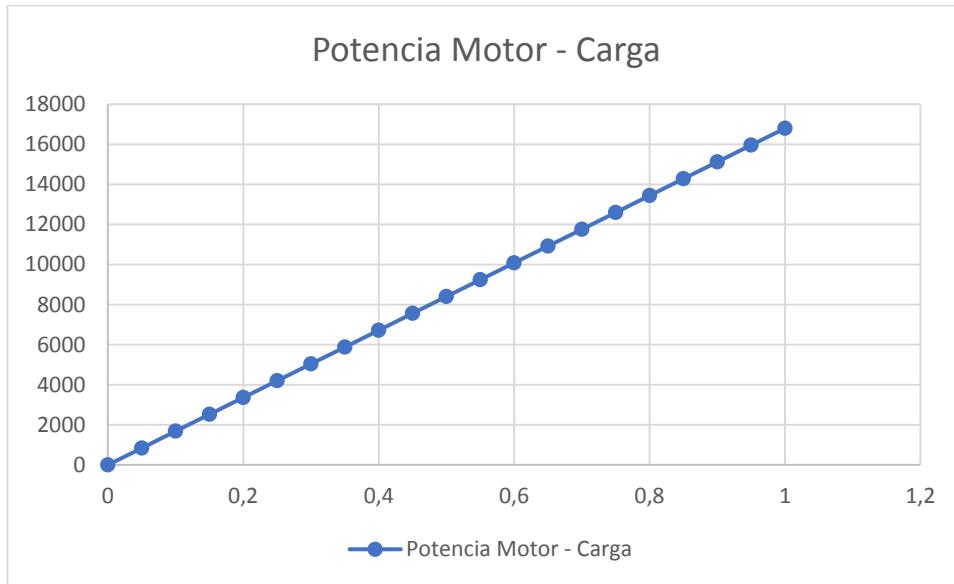
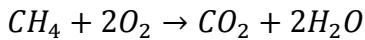


Figura 6.2 Diagrama potencia motor-carga

El valor obtenido para el fuel está en unidades de potencia (kW). Esta no es una unidad de medida de consumo de combustible por lo que se pasa a moles.

$$Fuel [mol/s] = \frac{Fuel [kW]}{4,18 [Cal/J] \Delta H_{CH_4}^\circ [kJ/mol]}$$

Conocidos los moles de combustible que intervienen en la reacción, toca averiguar cuantos van a ser los moles de CO₂ generados. Esto se obtiene a partir de la reacción de combustión:



Ajustando la reacción se observa que un mol de metano (CH₄) que son los que hacen referencia al gas natural, equivalen a otro mol de CO₂. Por tanto, los mol/s de CO₂ producido serán equivalentes a los de combustible aportado.

A continuación, conociendo el valor de la masa molar del CO₂ ($M_{molar,CO_2} = 44g/mol$) y los moles se calcula la masa.

$$n(moles/s) = \frac{m (gramos/s)}{M_{molar}(g/mol)}$$

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

Despejando

$$m \text{ (gramos/s)} = n(\text{moles/s}) \cdot M_{molar}(\text{g/mol})$$

Ahora se vuelve a hacer otro cambio de unidad, en este caso a días, para hacer una mejor idea del consumo. Se plantean 20 horas naveables al día.

$$m \left(\frac{\text{kg}}{\text{día}} \right) = m \left(\frac{\text{gramos}}{\text{s}} \right) \cdot 20 \text{h} \cdot \frac{3600 \text{s}}{1 \text{h}} \cdot \frac{1 \text{kg}}{1000 \text{g}}$$

De esta manera conociendo la cantidad de CO₂ que se genera para cada porcentaje de carga se representa de la siguiente manera:

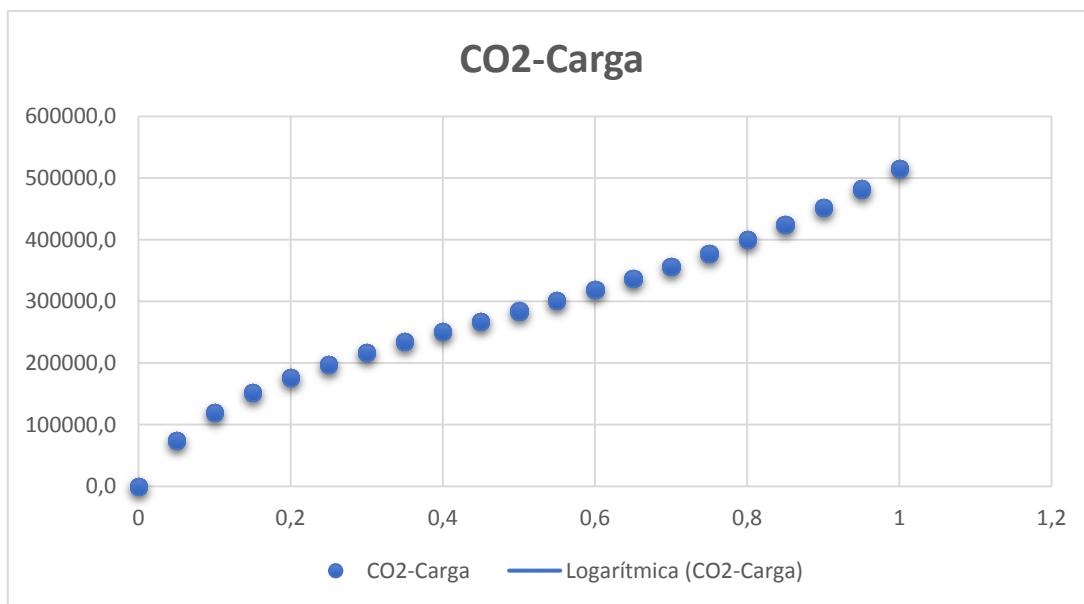


Figura 6.3 Diagrama CO₂ - carga

Como era de esperar, es de carácter creciente ya que más carga implica más potencia, por tanto, más consumo y producción de CO₂. Si que destaca que la evolución no es completamente lineal y esto se debe a que el motor trabaja mejor a unas condiciones de carga que a otras. De tal modo que, pese a estar bastante cargado y la producción de CO₂ ser elevada, una carga en torno al 80% seguiría siendo lo más adecuado. Porque pese a que la generación de CO₂ es elevada, la pendiente en ese tramo no es tan creciente como en otros.

Ahora se va a tener en cuenta no solamente la potencia aportada por el motor, también la aportada por el ciclo de vapor colocado a la salida de los motores. Por tanto, aparece la suma total de las potencias aportadas en la embarcación. Gráficamente, como es normal, se observa que tanto la potencia del motor como la

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

total es lineal con respecto al porcentaje de la carga. La potencia de este ciclo tiene un comportamiento lineal. Cuanta mayor sea la carga, mayor será la potencia transmitida, ya que más cantidad de gases saldrán provenientes del motor y mayor calor aportan a la caldera de recuperación para calentar el vapor de agua. Sumando la potencia obtenida de los motores más la del ciclo el resultado es el siguiente.

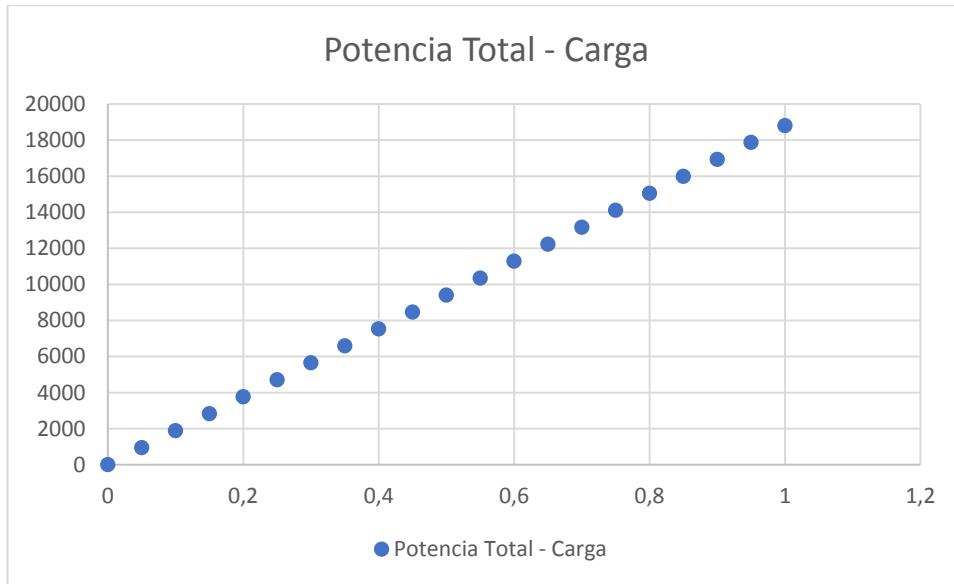


Figura 6.4 Diagrama potencia total-carga

Como se observa es el esperado, mayor potencia implica mayor cantidad de combustible, ya sea únicamente con los motores o sumándoles la colección de CO₂. Siguiendo igual que como se ha hecho para los motores, lo que se va a calcular ahora es el rendimiento total. Es decir, el comportamiento global de la embarcación una vez añadida la captura de CO₂ con respecto a la cantidad de combustible que lleve en sus depósitos.

La ecuación utilizada para el cálculo del rendimiento global es la siguiente:

$$\text{Rendimiento Total} = \frac{\text{Potencia total [kW]}}{\text{Fuel [kW]}}$$

Y la gráfica obtenida a partir de la representación del rendimiento para todos los valores de carga posible aparece a continuación.

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

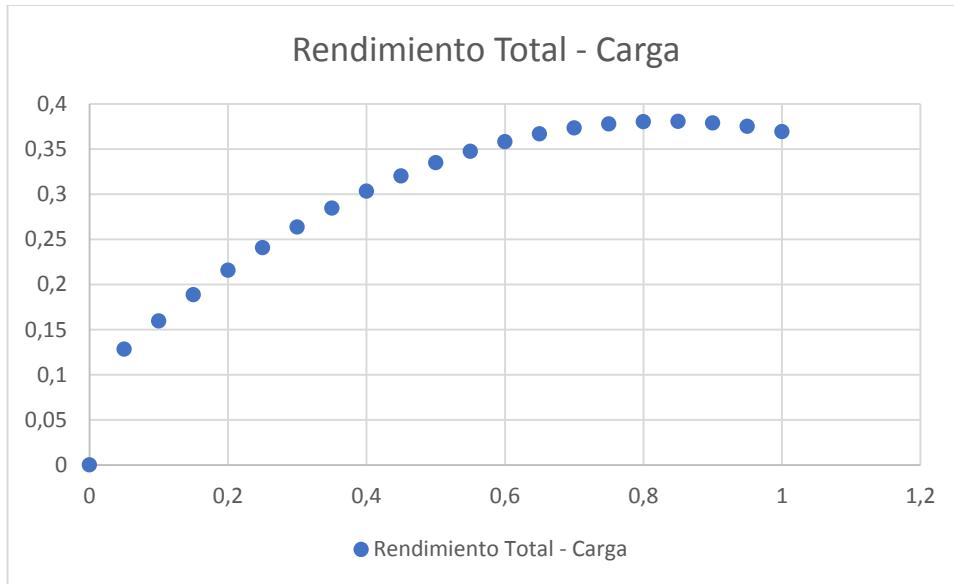


Figura 6.5 Diagrama potencia total-carga

El resultado es prácticamente igual al obtenido para motores, observándose los mejores resultados en torno al 80%.

Por último, se divide el CO_2 entre la potencia $\frac{m_{CO_2}}{Potencia}$ y el valor obtenido se enfrenta a distintos niveles de carga.

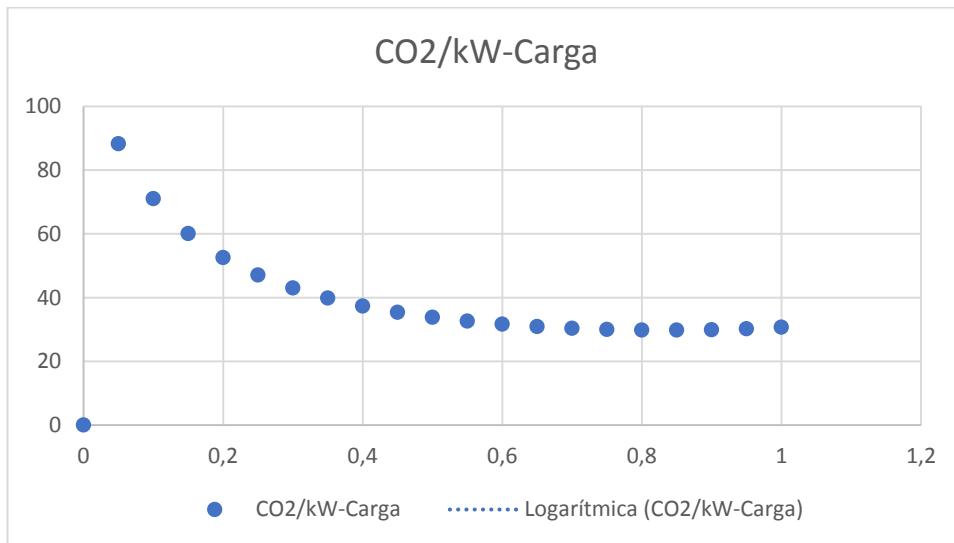


Figura 6.6 Diagrama CO₂/kW-carga

El valor del cociente de masa y potencia se va haciendo mayor a medida que se reduce la potencia, lo que muestra que, pese a producir más cantidad de CO_2 conforme más potencia se tiene en los motores (mayor potencia = mayor combustible necesario = más CO_2) la cantidad de CO_2 producida por kW es mayor para potencias

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

menores que para mayores. Por lo que es más rentable trabajar a un rango de potencias elevado, pese a producir más cantidad de contaminante. Este es el principal motivo por el que la gráfica sale de forma descendente. A menor carga menor potencia generada, pero en proporción más CO₂ producido por unidad de potencia.

8. BREVE COMPARACIÓN ECONÓMICA

Pese a que no se va a entrar en profundidad en una comparación económica ya que el objetivo final del proyecto no es otro que tratar de mostrar una alternativa de transporte que sea más respetuosa con el medio ambiente, si que se van a dar unos pequeños datos económicos al respecto.

Las emisiones de CO₂ en la actualidad se encuentran penalizadas y hay que pagar un precio por tonelada de CO₂ que se emite a la atmósfera. Las tasas se dividen en:

€/tonelada CO₂	
TASA ACTUAL	5
TASA PRÓXIMA ESTIMADA	30
TASAS FUTURAS	50-100

Tabla 7.1 Tasa de penalización por tonelada de CO₂

Como se puede observar en la tabla, en la actualidad la penalización que se aplica por enviar CO₂ a la atmósfera es muy reducido y es por lo que a muchas empresas les sale más rentable pagar este tipo de penalizaciones impuestas por los gobiernos, que ponerse a idear métodos de energía renovable para evitarlas. Está previsto que en los próximos años aumente esta penalización por contaminación. Medidas como estas y una mayor inversión en nuevas formas de desarrollo son las que darían un impulso considerable a la implantación de la energía sostenible. Al principio del proyecto, se propuso que el trayecto a realizar por la embarcación fuese el correspondiente al de viajar desde Trieste (Italia) a Estambul (Turquía), lo que equivale a un total de 2.075 kilómetros. Dicho viaje, a una potencia media del 85%, correspondería a un trayecto de unas 58 horas viajando a una velocidad de 20 nudos. Si las horas navegables son 20 horas/diarias, la duración del viaje sería de aproximadamente 3 días.

$$1 \text{ hora de viaje (al 85\% de potencia)} = 57.792 \text{ kg CO}_2$$

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

Calculando para un trayecto completo sería:

$$1 \text{ trayecto Trieste - Estambul} = 3.351.936 \text{ kg CO}_2$$

De esta manera, suponiendo que la embarcación realiza 80 viajes/año que es lo correspondiente a unos 240 días laborables, queda un total de:

$$\frac{\text{CO}_2}{\text{año}} = 268.155 \text{ Toneladas}$$

El precio que se pagaría para cada una de las sanciones antes nombradas quedaría:

€ en CO₂/aÑo	
TASA ACTUAL	1.340.774
TASA PRÓXIMA ESTIMADA	8.044.650
TASAS FUTURAS	13.407.750-26.815.500

Tabla 7.2 Total a pagar en un año en función de las tasas aplicadas

Se considera que el periodo elegido por el empresario para recuperar la inversión realizada va a ser de 5 años, por lo que el dinero a pagar debido a las sanciones impuestas en ese tiempo es:

€ en CO₂ /vida	
TASA ACTUAL	6.703.870
TASA PRÓXIMA ESTIMADA	40.223.250
TASAS FUTURAS	67.038.750-134.077.500

Tabla 7.3 Total a pagar en el periodo de *payback* elegido

Las diferencias económicas entre unos casos y otros son apreciables. Considerando los casos más opuestos, la diferencia entre el que correspondería a la tasa más cara y la actual sería de 25 millones de euros al año y si se calcula para el total de los cinco años elegidos como plazo de recuperación sería de algo más de 127 millones de euros.

La instalación diseñada previamente no va a capturar el 100% del CO₂ generado si no en torno al 70%, por lo que, seguirá teniendo que pagar una parte por emisiones de CO₂ contaminante. Estas cifras calculadas a 5 años vista supondrían el tope de

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

inversión que el empresario puede realizar si quiere obtener beneficio a partir de ese periodo.

Si se estudia el caso actual, la instalación debería costar un total inferior a 5 millones de euros si se tiene en cuenta el dinero a pagar en tasas (no se captura la totalidad del CO₂). Cifra que sin entrar a valorar el precio de todos los equipos, mano de obra, etc... es muy pequeña para poder cubrir todos los gastos. Mientras que si se trata de una penalización de 100 € / tonelada de CO₂ el capital para la inversión ascendería a 93 millones de euros.

Lo que se pretende mostrar con esto es que, no solo depende de si la tecnología actual es capaz de realizar el proceso o no, si no también que las características que rodean al problema son muy importantes. En este segundo supuesto de tasas de pago tan elevadas, hablando de un capital muy superior, se podría plantear el diseño rentable para un empresario de este tipo de actividad.

9. CONCLUSIONES

A modo de resumen se puede concluir las diferentes decisiones tomadas en cada uno de los capítulos.

En el inicio se expuso el marco teórico donde se iba a desarrollar la actividad. Definir la manera de propulsión del barco era esencial para poder desarrollar un sistema de acuerdo a las capacidades de la embarcación. Una vez establecida la ruta a realizar, definiendo la distancia recorrida en cada uno de los traslados y el tiempo en el que se efectuaría, se planteó el modelo CCS de captura de CO₂. Este método resultó ser el más adecuado, debido a que es una de las tecnologías más avanzadas en este ámbito hasta el momento. Además, la cantidad de calor requerida por las aminas, pese a ser elevada, podría llegar a ser aportada por la propia embarcación.

La manera de obtención de este calor adicional es el inconveniente principal que requiere este proceso. Para ello, se plantearon dos opciones muy diferentes que se dividían entre el aporte suministrado por el método WHR, utilizando el calor residual producido por la propia embarcación, y el que se aportaba a partir de la instalación de una turbina de gas. Tras analizar ambos casos, se pudo observar que el de la turbina de gas, en cuanto a rendimiento se refiere, era mucho más eficiente.

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

Pero a su vez, conllevaba un incremento en el capital muy considerable y unas dimensiones de la instalación extra para el aporte de calor todavía mayores. Principalmente estos dos motivos fueron los que hicieron que se optase por la otra opción, e intentar aprovechar las altas temperaturas con las que el motor expulsa los gases. A costa eso sí, de reducir el porcentaje de captura de CO₂ del ciclo.

En cuanto a las dimensiones de los depósitos para almacenar el CO₂, se plantearon diferentes situaciones variando entre el estado gaseoso y el líquido. El método para reducir al máximo el espacio necesario, sería almacenar el producto en estado líquido, aunque a su vez sería el más inestable. Si según los cálculos mostrados previamente, se obtiene una cantidad da CO₂ en cada viaje de unos 502.790 kg, y se adopta la alternativa de almacenarlo en estado líquido a una presión de 5.824kPa y - 56.6°C [19], entonces el volumen correspondiente a ese fluido sería muy elevado. Equivalente a un gran espacio, pese a estar en estado líquido y equivaliendo a una captura del proceso de sólo un 15%.

También se ha estudiado el comportamiento de los motores elegidos para distintas cargas de combustible. Tras llevar a cabo diferentes representaciones gráficas, se observó que el mejor comportamiento se obtenía para valores de carga del motor cercanos al 80%-90%. Valores en los que la relación de combustible consumido por kW aportado era la menor posible y por lo tanto se buscaba el máximo ahorro, ya que a menor combustible consumido, menor será el tamaño de la instalación de captura de CO₂ posterior.

Sin embargo, los resultados obtenidos de la simulación de los ciclos, tanto con captura de CO₂ como sin ella, muestran que el mayor rendimiento del ciclo de vapor se producirá al 100% de carga. Es coherente, a mayor potencia en los motores, mayor es la cantidad de gases que expulsan y a mayor temperatura, y por lo tanto más es el calor que se aporta al ciclo de vapor. De esta manera se ofrece un rendimiento del ciclo con captura de CO₂ de un 19,85% frente al 18,66% obtenido al 85% carga. Diferencia que pese a ser pequeña, debido a las grandes cantidades de las que se habla y el bajo rendimiento de los ciclos, ha de tenerse en cuenta.

Más tarde, se planteó en conjunto el rendimiento de los motores y del ciclo para poder obtener un dato que representase al barco entero. Y el resultado obtenido fue

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

mejor para la embarcación con 100% de carga y un rendimiento del 35,42% frente al 34,86% al 80% de carga.

Finalmente se hizo un pequeño análisis económico para estudiar la situación de la posible inversión tanto en el presente como a años próximos. Se tuvo en cuenta las sanciones actuales y las previstas y a partir de esos datos se calculó el ahorro que supondría para cada uno de los casos. Obteniéndose como resultado que, en la actualidad, la instalación de todo el sistema de captura sería muy poco productivo. Pero que, en el caso de que estas sanciones aumenten como es previsto, el margen de beneficio de cara al empresario es mayor.

Con todos estos datos, se ha tomado la decisión de que, en las condiciones actuales la instalación de este tipo de procesos no sería rentable para el empresario, ya que el beneficio obtenido no compensaría la inversión realizada y además la captura de CO₂ que se llevaría a cabo no sería de un alto porcentaje.

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

BIBLIOGRAFÍA

- [1] IEA, Energy Technology Perspectives 2012, International Energy Agency, Paris, 2012.
- [2] IMO, Mandatory energy efficiency measures for international shipping adopted at IMO environment meeting, Último acceso en 26 de febrero de 2017, desde:
<http://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/42-mepc-ghg.aspx#.VpfMfbPtmko>.
- [3] S. Goldthorpe, IEAGHG Information Paper; 2013-IP20: Maritime Carbon Capture and Storage, Último acceso en 26 de febrero de 2017, desde:
<http://ieaghg.org/publications/information-papers>.
- [4] PSE, DNV and PSE report on ship carbon capture & storage, Último acceso en 26 de febrero de 2017, desde: <https://www.psenterprise.com/news/news-press-releases-dnv-pse-ccs-report>.
- [5] EUROPA, Monitoring, reporting and verification of carbon dioxide emissions from maritime transport, and amending Directive 2009/16/EC, in, 2015.
- [6] Ship-technology, Onboard carbon capture: dream or reality?, Último acceso en 15 de marzo de 2017, desde: <http://www.ship-technology.com/features/featureonboard-carbon-capture-dream-or-reality/>.
- [7] WÄRTSILÄ, WÄRTSILÄ 46F PRODUCT GUIDE, Último acceso en 6 de marzo de 2017 desde: <http://www.wartsila.com/products/marine-oil-gas/engines-generating-sets/diesel-engines/wartsila-46f>.
- [8] S. Turbines; GAS TURBINE ADVANTAGES, Último acceso en 7 de marzo de 2017, desde: https://mysolar.cat.com/en_US/products/gas-turbine-overview/gas-turbine-advantages.html.
- [9] S. Turbines; Solar Turbines: CENTAUR 40 Gas Turbine Compressor Set, Último acceso en 7 de marzo de 2017, desde:
<http://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/C10550270>.
- [10] Y. Zhang, H. Chen, C.-C. Chen, J.M. Plaza, R. Dugas, G.T. Rochelle, Rate-Based Process Modeling Study of CO₂ Capture with Aqueous Monoethanolamine Solution, Industrial & Engineering Chemistry Research, Último acceso en 21 de

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO SIN EMISIONES DE CO₂

marzo de 2017 desde: https://www.researchgate.net/publication/245236313_Rate-Based_Process_Modeling_Study_of_CO2_Capture_with_Aqueous_Monoethanolamine_Solution

- [11] Michael J. Moran, Howard N. Shapiro. Fundamentos de Termodinámica técnica. 2^a Edición. Editorial Reverté, S.A., 2004.
- [12] RTVE. La contaminación atmosférica de los cruceros se extiende a 400 km de Barcelona. Último acceso en 17 de abril de 2017, desde: www.rtve.es/noticias/
- [13] Sánchez Morell, Gonzalo. Análisis del comportamiento de una turbina de gas. Proyecto de Fin de Carrera. Universidad Politécnica de Madrid (2016).
- [14] Ensayos de turbinas de acción. Curvas Características. Universidad del País Vasco-Campus Guipuzkoa. (5 de julio de 2015).
- [15] Tecnología de captura y almacenamiento de CO₂. Fundación para estudios sobre la energía.
- [16] Ahorro, eficiencia y sistemas de gestión energética. Congreso Nacional del Medio Ambiente (Conama 2012). Madrid, 2008.
- [17] Xiaobo Luo, Meihong Wang. Study of solvent-based carbon capture for 1 cargo ships through process modelling and simulation. Department of Chemical and Biological Engineering, the University of Sheffield, Sheffield S1 3JD United Kingdom (2017).
- [18] DECC, CCS Cost Reduction Task Force: final report, Último acceso en 6 de abril de 2017, desde: <https://www.gov.uk/government/publications/ccs-cost-reduction-task-force-final-report>.
- [19] Infra Air Products, hoja de producto. Último acceso en 19 de septiembre de 2017, desde: http://www.infra.com.mx/wpcontent/uploads/2013/09/dioxido_carbono_liquido.pdf
- [20] Hosteltur, Ranking Hostel Tour de facturación de las grandes cadenas hoteleras. Último acceso en 19 de septiembre de 2017: http://www.hosteltur.com/122366_infografia-grandes-cifras-sector-cruceros-mundial.html
- [21] José V. Colomer, Alfredo García Eds.), IV Congreso de Ingeniería del Transporte (Valencia).