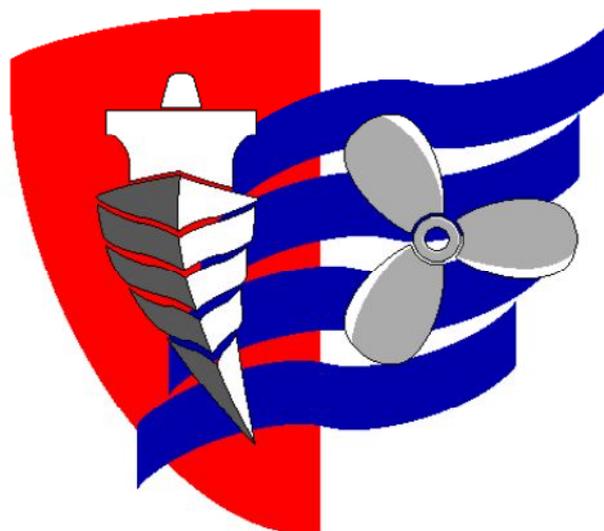


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Máster

**IMPLANTACIÓN DE PLACAS SOLARES PARA
MEJORAR EL CONSUMO EN CALDERAS
MARINAS**

**IMPLANTATION OF SOLAR PANELS TO
IMPROVE CONSUMPTION IN MARINE BOILERS**

**Para acceder al Título de Máster universitario en
INGENIERÍA MARINA**

**Autor: Miguel Daniel Rodríguez Ramos
Director: Sergio García Gómez
Diciembre -2017**

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Trabajo Fin de Máster

**IMPLANTACIÓN DE PLACAS SOLARES PARA
MEJORAR EL CONSUMO EN CALDERAS
MARINAS**

**IMPLANTATION OF SOLAR PANELS TO
IMPROVE CONSUMPTION IN MARINE BOILERS**

**Para acceder al Título de Máster universitario en
INGENIERÍA MARINA**

**Autor: Miguel Daniel Rodríguez Ramos
Director: Sergio García Gómez**

Diciembre -2017

ÍNDICE

1.	RESUMEN.....	4
2.	SUMMARY.....	4
3.	SIMBOLOGÍA.....	5
4.	PALABRAS CLAVE	6
5.	INTRODUCCIÓN	6
5.1	Antecedentes.....	6
5.2	Naturaleza del trabajo	7
5.3	Contexto técnico.....	10
5.4	Justificación	14
5.5	Objetivos.....	14
5.6	Relevancia.....	15
6.	MEMORIA DESCRIPTIVA	15
6.1	Planteamiento del problema	15
6.1.1	<i>Descripción de la instalación de vapor</i>	15
6.1.2	<i>Descripción de la instalación de vapor con placas solares</i>	17
6.2	Herramientas de resolución	20
6.2.1	<i>Estudio teórico</i>	23
6.2.2	<i>Cálculo de fracciones másicas</i>	24
6.2.3	<i>Balance energético de las instalaciones</i>	26
6.2.4	<i>Cálculo del gasto de combustible en las instalaciones</i>	32
6.2.5	<i>Cálculo de la potencia calorífica</i>	33
6.2.6	<i>Utilización de la energía solar</i>	34
6.2.7	<i>Información sobre placas solares</i>	35
6.2.8	<i>Presupuesto placas solares</i>	46
6.3	Metodología	49
7.	APLICACIÓN PRÁCTICA	51
7.1	Gráficas	62
8.	CONCLUSIONES.....	66
9.	BIBLIOGRAFÍA	68

1.RESUMEN

En el presente trabajo se realizarán cálculos a partir de un ciclo de vapor obtenido de una instalación de vapor marina. A partir de estos datos, se calculará el consumo de combustible.

Al mismo tiempo se procederá a realizar los cambios oportunos en los valores de partida del ciclo debido a la instalación de las placas solares, y en consecuencia se calcularán nuevamente los valores de consumo, rendimiento, etc.

Además, se tendrán en cuenta 3 disposiciones diferentes en la instalación, comprobando cual es más factible y adecuada.

Y, por último, pero no menos importante, se planteará qué disposición y qué características tendrán las placas solares instaladas en la cubierta del buque.

2.SUMMARY

In the present work, calculations will be made from a steam cycle obtained from a marine vapor installation. From this data, the fuel consumption will be calculated.

At the same time, we will proceed to make the appropriate changes in the starting values of the cycle due to the installation of the solar panels, and consequently we will calculate again the values of consumption, performance, etc.

Besides, three different requirements will be taken into account in the installation, checking which is more feasible and suitable.

And last but not least, we will consider what arrangement and what characteristics will have the solar panels installed on the ship's deck.

3.SIMBOLOGÍA

Nombre	Símbolo	Unidad
Calor Absorbido Normal	Q_{absN}	kJ/kg
Calor Absorbido Mixto	Q_{absM}	kJ/kg
Calor Absorbido Placas	Q_{absP}	kJ/kg
Caudal de vapor	Q_{vapor}	Kg/s
Entalpía	h	kJ/kg
Entropía	s	kJ/kg°C
Fracciones másicas	m	-
Gasto Combustible	B	Kg/s
Poder Calorífico	PC	kJ/kg
Potencia Calorífica	P_{Cal}	kW
Potencia Turbina	P_{Turb}	kW
Rendimiento Térmico Normal	terN	-
Rendimiento Térmico Mixto	terM	-
Rendimiento Térmico Placa	terP	-
Trabajo Bomba Normal	W_{BombN}	kJ/kg
Trabajo Bomba Mixto	W_{BombM}	kJ/kg
Trabajo Bomba Placa	W_{BombP}	kJ/kg
Trabajo Fin de Master	TFM	-
Trabajo Turbina Normal	W_{TurbN}	kJ/kg
Trabajo Turbina Mixto	W_{TurbM}	kJ/kg
Trabajo Turbina Placa	W_{TurbP}	kJ/kg

4.PALABRAS CLAVE

Placas solares
Combustible
Ahorro
Eficiencia
Caldera

5.INTRODUCCIÓN

5.1 Antecedentes

En la actualidad las instalaciones de vapor que encontramos en los buques que operan con ciclos de Rankine son mayoritarias. Lo más común en este tipo de instalaciones para conseguir el máximo rendimiento, es que se produzcan extracciones en la turbina principal, llevando este vapor a un tren de calentadores que calentaran previamente el agua de alimentación de la caldera.

Si bien es cierto hoy en día no hay casi ningún buque que utilice plantas de vapor como propulsión principal, sino más bien se utiliza el vapor generado para calentar combustible, aceite, agua, etc.

Por otro lado, el gasto de combustible que supone la utilización de esta planta, se ve afectada por los rendimientos de la instalación, tanto el térmico, como el de la turbina, el de los propios intercambiadores, etc. Para intentar mejorar el gasto de combustible, se procederá a comparar como mejora la

instalación al sustituir los intercambiadores por un sistema de placas solares en cubierta.

5.2. Naturaleza del trabajo

En este trabajo nos centraremos en la mejora del rendimiento y la reducción de las emisiones CO₂ según la normativa las cuales son [9]:

- Según el reglamento de ejecución (UE) 2016/1927 de la comisión de 4 de noviembre de 2016 las acciones a tomar son:

El artículo 6, apartados 1 y 3, del Reglamento (UE) 2015/757 obliga a las empresas a presentar al verificador un plan de seguimiento consistente en una descripción exhaustiva y transparente del método de seguimiento aplicado a cada buque incluido en el ámbito de aplicación de dicho Reglamento.

- Para garantizar que dichos planes de seguimiento contengan información normalizada que permita una aplicación armonizada de las obligaciones de seguimiento y notificación, es preciso establecer modelos, incluidas normas técnicas para su aplicación uniforme.
- El plan de seguimiento debe contener, como mínimo, los elementos enumerados en el artículo 6, apartado 3, del Reglamento (UE) 2015/757. Además, para determinar la «carga transportada», debe emplear las unidades especificadas en el Reglamento de Ejecución (UE) 2016/1928 (2) de la Comisión. Dados los dos tipos diferentes de servicios de transporte que prestan los buques de tipo ro-pax, en sus datos de consumo de combustible y emisiones de CO₂ dichos buques deberán distinguir entre transporte de mercancías y transporte de

pasajeros. Esto permitirá determinar mejor sus indicadores de eficiencia energética operativa media.

- Sin perjuicio de lo dispuesto en el artículo 6, apartado 3, del Reglamento (UE) 2015/757, y con arreglo al último párrafo del artículo 10 de dicho Reglamento, el plan de seguimiento debe permitir el seguimiento y notificación del consumo de combustible y las emisiones de CO₂ en función de otros criterios voluntarios. Esto permitirá entender mejor la eficiencia energética media notificada. Lo anterior se aplica, en particular, al seguimiento diferenciado del consumo de combustible para calefacción de la carga y para posicionamiento dinámico y al seguimiento diferenciado de los viajes con carga y la navegación por hielo.
- Para facilitar la elaboración de los planes de seguimiento de empresas con varios buques, conviene autorizar a las empresas a indicar qué procedimientos descritos en el plan de seguimiento es pertinente aplicar a todos los buques bajo su responsabilidad.
- Cuando el plan de seguimiento incluya información sobre elementos y procedimientos de conformidad con el artículo 6, apartado 3, del Reglamento (UE) 2015/757, las empresas también deben poder remitirse a procedimientos o sistemas que ya apliquen eficazmente dentro de sus sistemas de gestión, como el Código Internacional de Gestión de la Seguridad (Código IGS) (1) y el Plan de Gestión de Eficiencia Energética del Buque (PGEEB) (2), o a sistemas y controles armonizados de gestión de calidad, medioambiental o energética, tales como las normas EN ISO 9001:2015, EN ISO 14001:2015 o EN ISO 50001:2011.

- Para facilitar el seguimiento, conviene permitir el uso de valores por defecto para el nivel de incertidumbre asociado al seguimiento del consumo de combustible.
- Para facilitar el ciclo de cumplimiento completo (incluido el seguimiento, la notificación y la verificación), la información sobre gestión, en particular sobre las actividades adecuadas de control y gestión de datos, debe considerarse información útil. Una sección especial del modelo para el seguimiento ayudará a las empresas a estructurar los elementos de gestión necesarios.
- Es preciso establecer las especificaciones de un modelo electrónico para los informes de emisiones. Esto es necesario para que los informes de emisiones verificadas se presenten por vía electrónica y contengan información agregada anual completa y normalizada, que pueda hacerse pública y permita a la Comisión elaborar los informes exigidos en virtud del artículo 21 del Reglamento (UE) 2015/757.
- El informe de emisiones debe recoger como mínimo los contenidos contemplados en el artículo 11, apartado 3, del Reglamento (UE) 2015/757, incluidos los resultados del seguimiento anual. También debe permitir la notificación de información adicional que ayude a comprender los indicadores de eficiencia energética operativa media comunicados voluntariamente. Se trata, en particular, de los elementos para el seguimiento voluntario del combustible consumido y el CO₂ emitido, diferenciados en función de criterios especificados en el plan de seguimiento.
- Es preciso establecer normas técnicas que definan un modelo electrónico para los documentos de conformidad. Eso garantizará que pueda incluirse información normalizada y fácilmente procesable en los

documentos de conformidad enviados por los verificadores con arreglo al artículo 17, apartado 4, del Reglamento (UE) 2015/757, para informar sin demora a la Comisión y a las autoridades del Estado de abanderamiento de la expedición de un documento de conformidad.

- THETIS SNV, sistema de información específico de la Unión creado y gestionado por la Agencia Europea de Seguridad Marítima, debe estar disponible para las empresas y los verificadores acreditados de modo que puedan utilizarlo para presentar por vía electrónica a la Comisión y a los Estados de abanderamiento informes de emisiones verificadas satisfactoriamente, con sus documentos de conformidad correspondientes. El sistema debe concebirse de manera flexible, de modo que permita la posibilidad de un sistema mundial de seguimiento, notificación y verificación de las emisiones de gases de efecto invernadero.
- La Comisión ha consultado a las partes interesadas sobre las mejores prácticas en relación con los asuntos regulados por el presente Reglamento. La consulta se llevó a cabo a través de los «subgrupos de expertos en SNV del transporte marítimo», creado dentro del Foro Europeo de Navegación Sostenible.
- Las medidas previstas en el presente Reglamento se ajustan al dictamen del Comité del Cambio Climático creado por el artículo 26 del Reglamento (UE) n.o. 525/2013 del Parlamento Europeo y del Consejo (3).

5.3. Contexto técnico

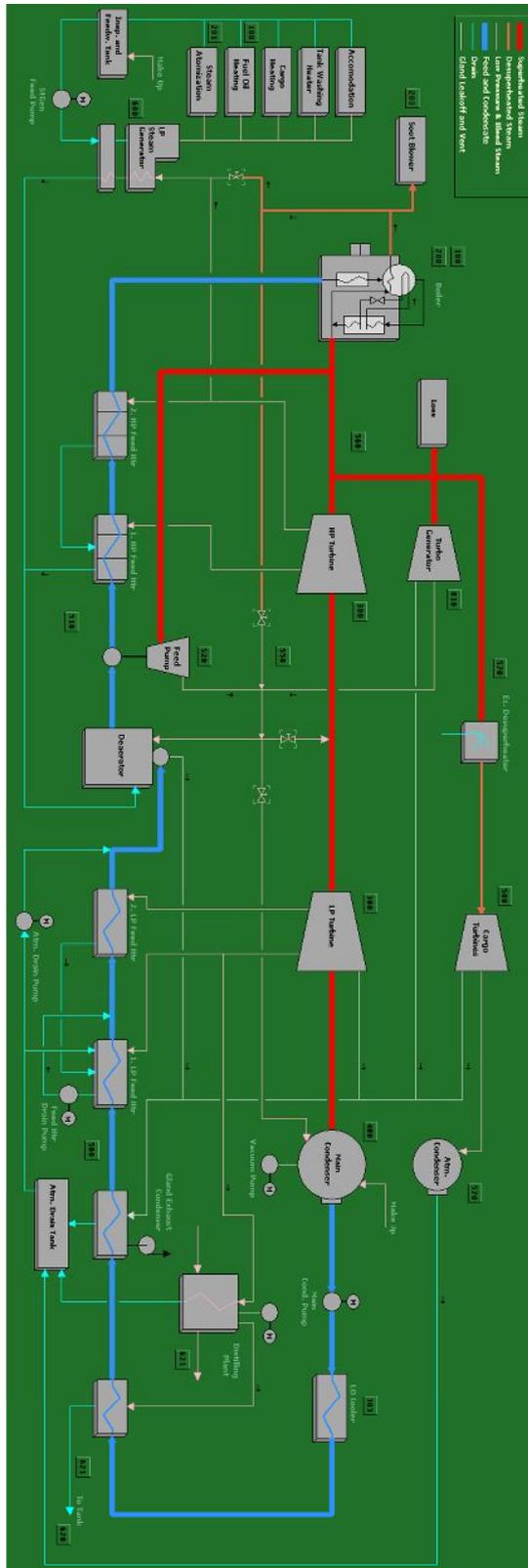
La instalación del estudio que se usará hace referencia a un buque cuya propulsión es a partir de una turbina de vapor, que utiliza el ciclo de vapor de fluido condensable o de Rankine. En una planta que opera con este ciclo de

vapor, la energía química inherente al combustible primero se transforma para elevar la entalpía de los gases de combustión. Esta entalpía se transfiere por convección y radiación al fluido de trabajo: mientras una parte de la entalpía del fluido de trabajo se convierte en energía mecánica en la turbina, otra se libera al ambiente por medio del sistema de enfriamiento.

El ciclo que sigue el fluido en la instalación es el siguiente:

1. El fluido de trabajo cambia de estado en la caldera, esto es debido a la absorción del calor, producido por la combustión del combustible usado.
2. El vapor generado en la caldera es enviado a la turbina, en la que se producirá la expansión de este, generando un trabajo. Durante el proceso de expansión se realizarán una serie de extracciones [1] en diferentes puntos de la turbina. Estas se enviarán a los intercambiadores, usándose para ir precalentando el fluido de trabajo principal, antes de introducirlo nuevamente en la caldera.
3. Cuando el vapor sale de la turbina, circulará a través de un condensador, el cual lo condensará y mediante una bomba se enviará por la línea principal a la caldera
4. En el primer caso el vapor condensado se hará circular por una serie de intercambiadores, donde se producirá el precalentamiento del condensado. En este caso uno de los intercambiadores funciona como desgasificador, evitando posibles daños en la línea.
5. En el segundo caso el vapor se hará circular a través de un campo de placas solares situado en la cubierta del buque
6. Por último, una vez el fluido haya pasado por el tren de intercambiadores o por las placas solares, el ciclo finaliza con la entrada de este en la caldera.

Imagen5.1: Esquema Instalación Vapor SP25

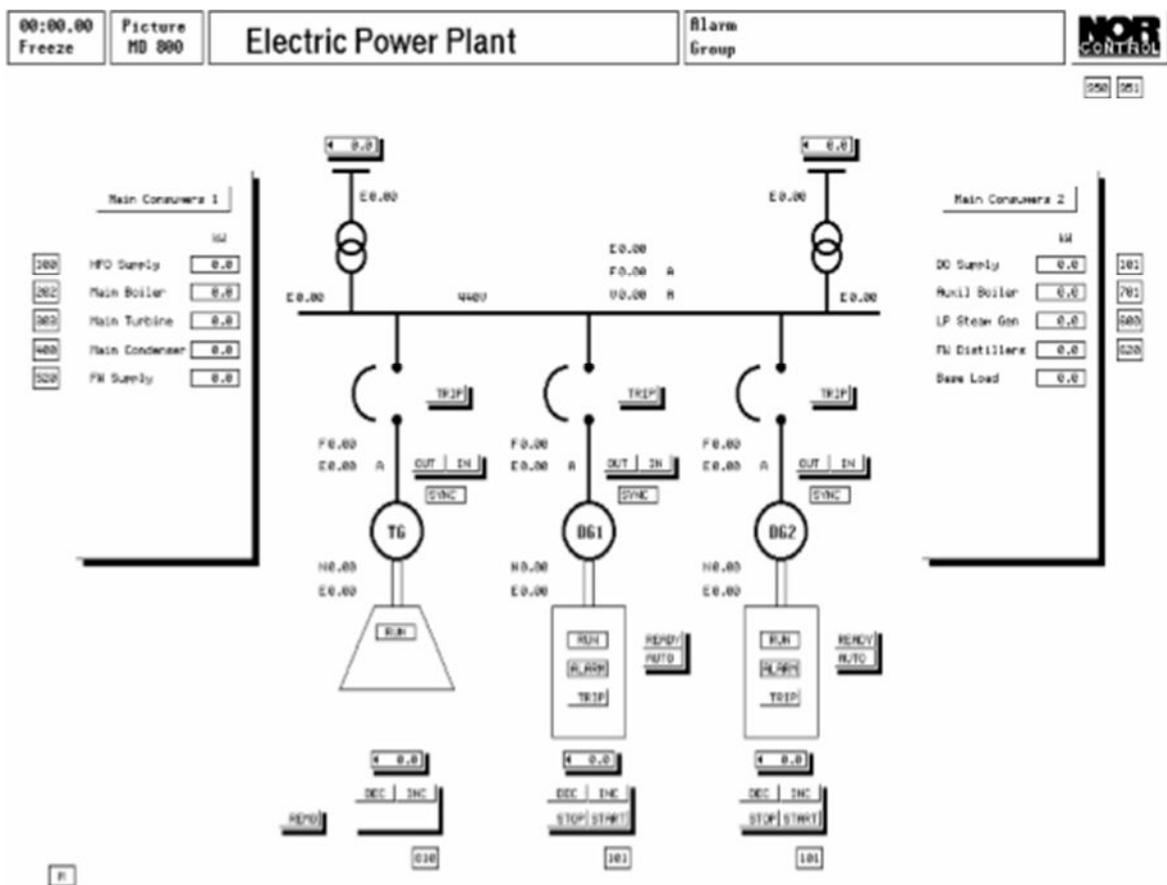


Fuente: Manual Simulador SP25

El buque de estudio es un superpetrolero con propulsión de vapor, como se puede ver en la imagen 5.1. Para la obtención de datos se ha utilizado un simulador el cual incluía un escenario denominado SP25, correspondiendo a este superpetrolero. [2]

La planta eléctrica está compuesta por un turbogenerador y dos generadores diésel (Imagen 5.2). En navegación, el turbogenerador es capaz de asumir toda la demanda eléctrica, y por lo tanto es el único que se encuentra operativo. [2]

Imagen5.2: Planta eléctrica



Fuente: Manual SP25

5.4. Justificación

Partiendo del conocimiento sobre la normativa medioambiental, así como el gasto de combustible que genera el funcionamiento de un buque, se llega a la conclusión de que es bastante importante controlar este gasto, ya que no solo se controlará el consumo de este para un ahorro económico de la compañía, sino que también supondrá una menor emisiones de CO₂. Pudiendo usarse este ahorra en invertirlo para acciones para controlar aún más la emisión de CO₂.

5.5 Objetivos

El objetivo general fue el estudio de la mejora de la eficiencia energética de una instalación de vapor de un buque mediante la introducción de placas solares en su instalación.

Los objetivos específicos de este trabajo son:

- Toma de datos de la instalación del simulador SP25.
- Cálculo de todos los puntos de la instalación para la obtención de potencias y rendimientos.
- Realizar el Balance Energético de la instalación instalada.
- Sustitución del tren de precalentadores por un campo de placas solares, para realizar nuevamente el balance energético y ver los cambios.
- Elaboración de tablas y gráficas para comparar las diferentes disposiciones estudiadas. En este caso 3.

5.6. Relevancia

Como ya se ha planteado, esta investigación es importante, ya que se controla las emisiones de CO₂. Además, esta investigación se puede aplicar a todos los buques que dispongan de un sistema de vapor (caldera marina) simplemente escalando los datos obtenidos.

Aunque en este caso solo hacemos los cálculos en buques, esta investigación se puede aplicar perfectamente a instalaciones de tierra que generan electricidad, consiguiendo el mismo resultado que en los buques.

6. MEMORIA DESCRIPTIVA

6.1 Planteamiento del problema

El principal problema investigado es el estudio de varias disposiciones para ahorrar en combustible mediante el uso de placas solares.

6.1.1 Descripción de la instalación de vapor

El sistema de vapor consiste en una planta de propulsión con turbina de vapor que proporciona la energía a un superpetrolero (VLCC). La turbina es capaz de generar una potencia de unos 25000 kW en el eje propulsor.

La planta de vapor representa un ciclo de vapor regenerativo de cinco fases (Imagen 6.1), esto quiere decir que posee un tren de precalentadores compuesto por 4 de superficie y uno de mezcla, el cual funcionaría al mismo tiempo como desaireador, evitando de esta forma posibles daños en el sistema por presencia de gases.

El condensador principal está dotado de refrigeración por cuchara. El aire se retira del condensador por medio de unas bombas mecánicas de vacío. [2]

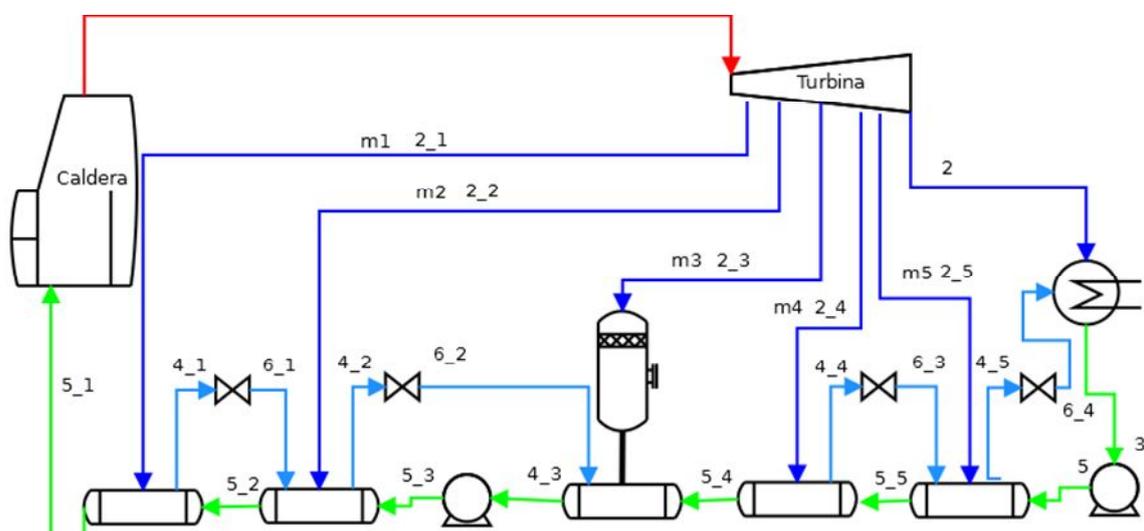
Las extracciones de la turbina de baja presión proporcionan dos etapas de calentamiento del agua de alimentación. [2]

Las extracciones de la turbina de alta presión suministran vapor de calentamiento al generador de vapor y a los dos calentadores de alimentación a alta presión. [2]

En condiciones normales de navegación, el turbogenerador es suficiente para la generación de energía eléctrica. El sistema dispone de dos generadores diésel de reserva. [2]

Para entender un poco mejor la planta se cogió la instalación y se creó un esquema visual en el cual se marcaron los puntos más representativos de la instalación para su estudio.

Imagen6.1: Esquema Instalación de Vapor



Fuente: Diagrama hecho con DIA

Tabla 6.1: Leyenda Diagrama

Color	Descripción
Rojo →	Vapor Salida de la Caldera
Azul →	Extracciones de vapor
Azul flojo →	Vapor con menor temperatura
Verde →	Agua de Alimentación

Fuente: Propia

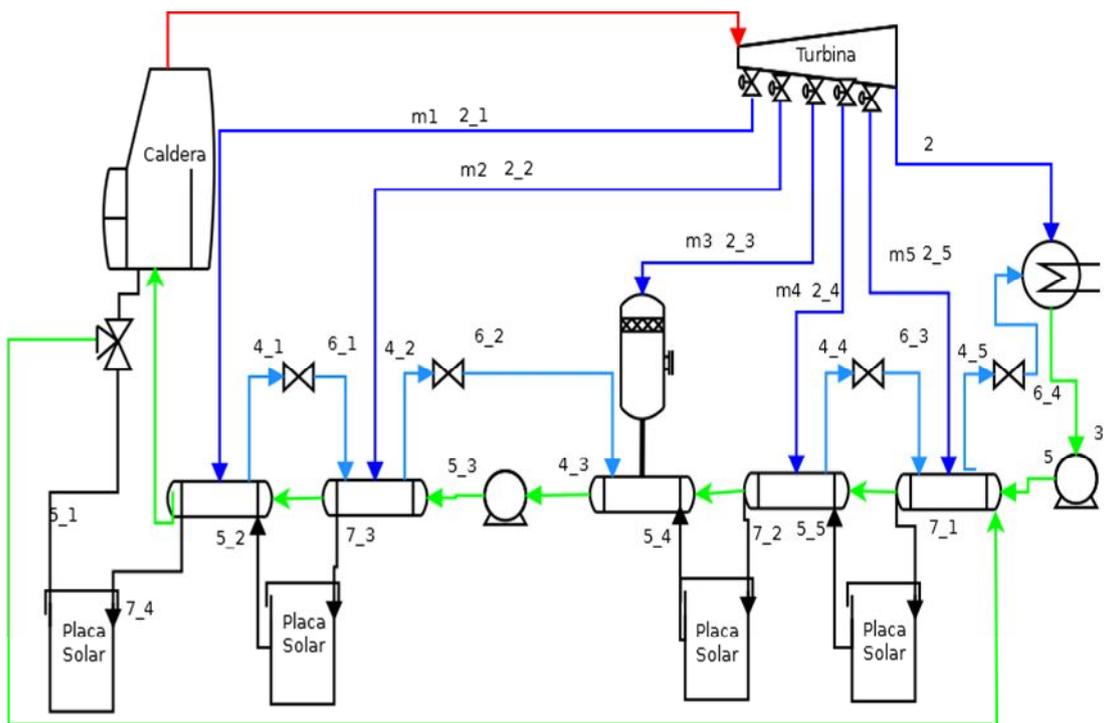
6.1.2 Descripción de la instalación de vapor con placas solares

La alternativa que se quiere incluir, se lleva a cabo a partir de la utilización de placas solares, para precalentar el agua de alimentación antes de introducir ésta en la caldera.

En el primer caso la instalación contara con grupos de placas solares que actuarán como los precalentadores durante los momentos del día que se pueda usar la energía térmica del sol (Imagen6.3). En el segundo caso se utilizarán tanto las placas solares como los precalentadores (Imagen6.2), con la salvedad de que el caudal de las extracciones que se usa será menor que en el caso de solo precalentadores. Para regular esto se incluirá en la instalación, justo antes de la entrada de la caldera, una válvula de tres vías controlado por un sensor de temperatura, el cual detectará si el agua se encuentra a la temperatura de trabajo adecuada. Si por alguna razón no cumpliera con la temperatura de consigna, el fluido se enviará nuevamente al

principio de la instalación, utilizando en este caso los precalentadores que usan las extracciones de la turbina, controlándose el caudal que se extrae mediante válvulas comandadas por el sensor de temperatura.

Imagen 6.2: Instalación de Vapor Mixta



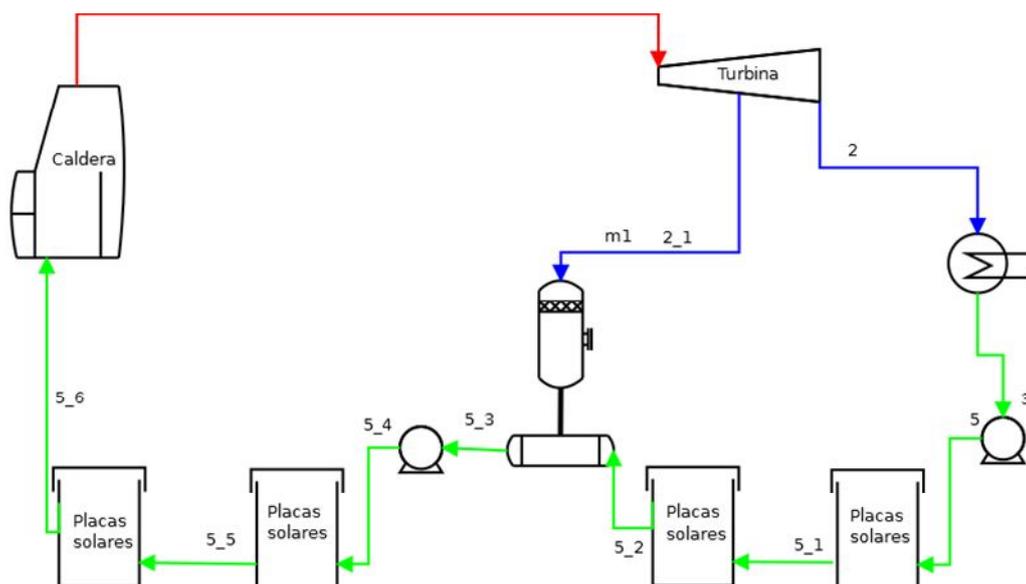
Fuente: Diagrama hecho con DIA

Tabla 6.2: Leyenda Diagrama

Color	Descripción
Rojo →	Salida vapor de la caldera
Azul →	Extracciones de vapor
Azul Flojo →	Vapor menos temperatura
Verde →	Agua de alimentación Preca.
Negro →	Agua de alimentación placas

Fuente: Propia

Imagen6.3: Instalación de Vapor solo Placas



Fuente: Diagrama hecho con DIA

Tabla 6.3: Leyenda Diagrama

Color	Descripción
Rojo →	Salida vapor de la caldera
Azul →	Extracción de Vapor
Verde →	Agua de alimentación

Fuente: Propia

6.2. Herramientas de resolución

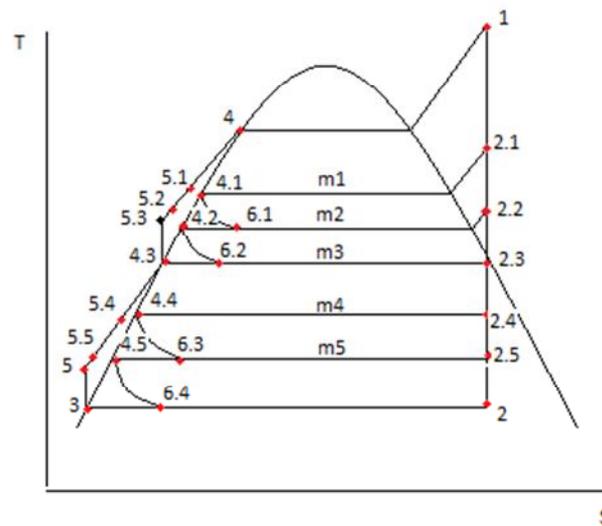
Para poder solventar los diferentes cálculos lo primero que hicimos fue crear una serie de ciclos para realizar los diferentes estudios.

Al mismo tiempo para poder estudiar de forma más precisa las diferentes instalaciones, y poder realizar los cálculos oportunos que nos permiten valorar si una disposición es más efectiva que otra, se generarán ciclos de T-s, (Temperatura- Entropía).

1. El primer ciclo (Imagen 6.4), corresponde a la instalación normal, es decir, cuando únicamente operan los precalentadores.
2. El tercer ciclo correspondería a la instalación operando únicamente con las placas solares (Imagen 6.6), cerrando la salida de las extracciones de la turbina. El único intercambiador que se queda operativo es el de mezcla, ya que se usa como desaireador.

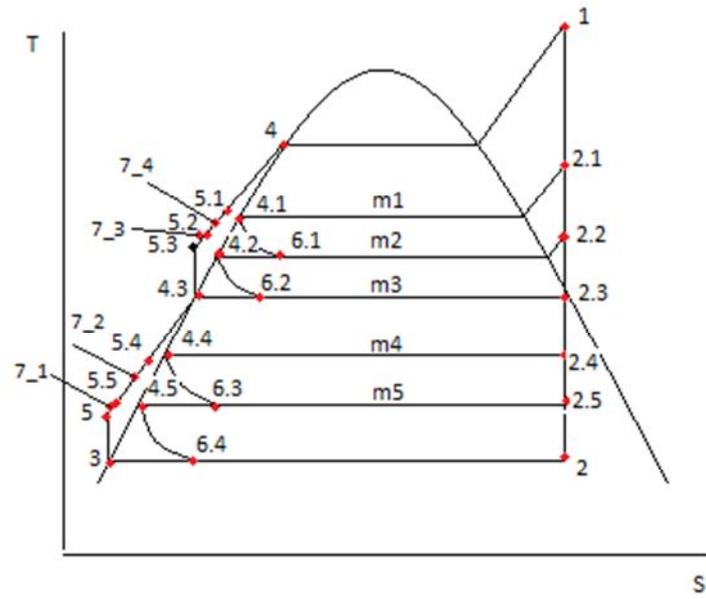
3. El segundo ciclo corresponde a la instalación operando de manera mixta (Imagen 6.5), es decir, usando tanto las placas como los precalentadores.

Imagen6.4: Ciclo T-s con Precalentadores



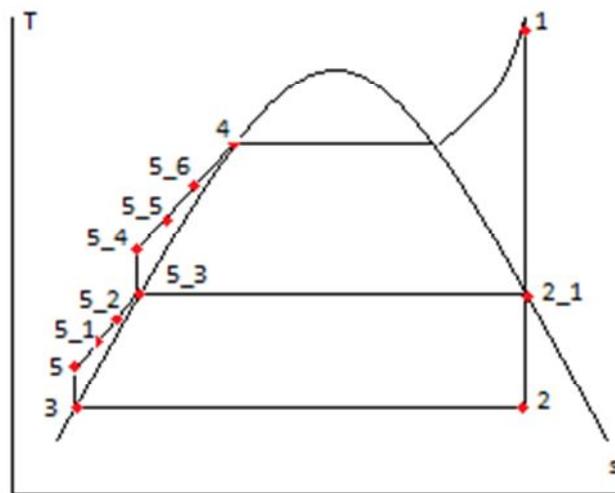
Fuente: Propia

Imagen 6.5: Ciclo T-s mixto



Fuente: Propia

Imagen 6.6: Ciclo T-s con placas solares



Fuente: Propia

6.2.1. Estudio teórico

Para poder realizar los diferentes estudios es necesario conseguir una serie de datos de los puntos más representativos, para ello se crearán una serie de tablas donde se recogerán los siguientes valores:

- Presión.
- Temperatura.
- Entalpía
- Entropía

Cada uno de los valores citados anteriormente se obtendrán de varios puntos, usando para ello los ciclos correspondientes a cada disposición, los cuales esta recogidos en las imágenes 6.4, 6.5 y 6.6.

Además, es necesario tener en cuenta que para poder calcular los distintos valores se usará una hoja de cálculo en la que esta definida la macro 'Steamtablesby Magnus Holmgrenaccordingto IAPWS IF-97', en esta macro vienen definidas todas las propiedades termodinámicas del agua, lo que permitirá calcular los diferentes estados termodinámicos de los diferentes puntos estudiados en el ciclo.

Para poder completar la tabla, es necesario tener al menos dos de los cuatro valores a calcular, utilizando la siguiente expresión:

$$= x_{ab}(n; m)$$

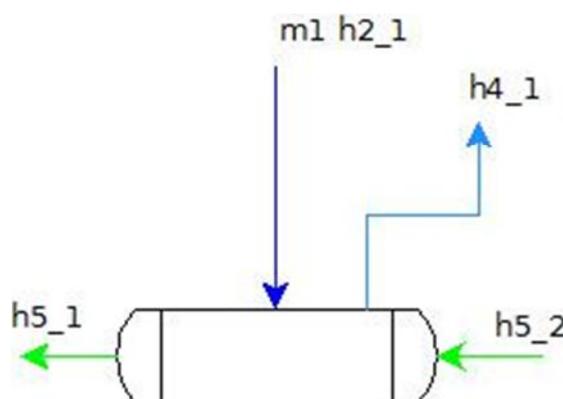
Donde x es el valor de la incógnita que se quiera calcular, a y b, son los estados termodinámicos que se tienen para calcular x, y por último n-m, siendo estos los valores numéricos de a-b.

6.2.2. Cálculo de fracciones másicas

Antes de comenzar con los balances energéticos de cada una de las diferentes disposiciones, es necesario realizar el cálculo de las fracciones másicas. Para poder calcular las fracciones másicas es necesario realizar una igualación del elemento que se quiera estudiar, es decir, se calcula al realizar un balance energético del elemento, igualando las entradas del fluido en este con las salidas, como se puede ver en la imagen 6.7.

Para poder hacer esta igualación es necesario tener en cuenta las entalpías en los puntos de entrada y salida del elemento, así como las diferentes proporciones de caudal. Además, para facilitar el trabajo del cálculo de las fracciones másicas se usa la herramienta WxMaxima. Obteniendo la ecuación general, bastando con utilizar el valor de la entalpía correspondiente en cada caso.

Imagen 6.7= Cálculo Fracciones Másicas



Fuente: Propia

La primera será la instalación de vapor sin placas

Al tener 5 precalentadores, será necesario calcular 5 fracciones másicas.

1. Fracción másica 1.

$$m1 = \frac{h52 - h51}{h41 - h21}$$

2. Fracción másica 2.

$$m2 = \frac{((h61 - h42) * m1) + h53 - h52}{h42 - h22}$$

3. Fracción másica 3.

$$m3 = \frac{((h62 - h54) * (m1 + m2)) + h54 - h43}{h54 - h23}$$

4. Fracción másica 4.

$$m4 = \frac{(-1 + m1 + m2 + m3) * (h55 - h54)}{h44 - h24}$$

5. Fracción másica 5.

$$m5 = \frac{(-1 + m1 + m2 + m3) * (h55 - h5)}{h45 - h25}$$

La segunda sería fracciones másicas instalación solo con placas

En este caso solo se tendría que calcular una única fracción másica ya que no se producen extracciones de la turbina mientras estén operativas las placas.

Fracción másica 1.

$$m1 = \frac{h53 - h52}{h21 - h52}$$

La tercera es fracciones másicas instalación mixta

1. Fracción másica 1.

$$m1 = \frac{h74 - h52}{h21 - h41}$$

2. Fracción másica 2.

$$m2 = \frac{h73 - h53 + (m1 * (h42 - h61))}{h22 - h42}$$

3. Fracción másica 3.

$$m3 = \frac{(h43 + ((m1 + m2) * (h54 - h62)) - h54)}{h23 - h54}$$

4. Fracción másica 4.

$$m4 = \frac{(h72 - h55) * (1 - m1 - m2 - m3)}{h24 - h44}$$

5. Fracción másica 5.

$$m5 = \frac{((h71 - h5) * (1 - m1 - m2 - m3)) + (m4 * (h45 - h63))}{h25 - h45}$$

6.2.3. Balance energético de las instalaciones

Para poder realizar un balance energético adecuado es necesario definir correctamente el sistema de estudio en una serie de puntos de control como ya se ha dicho en apartados anteriores.

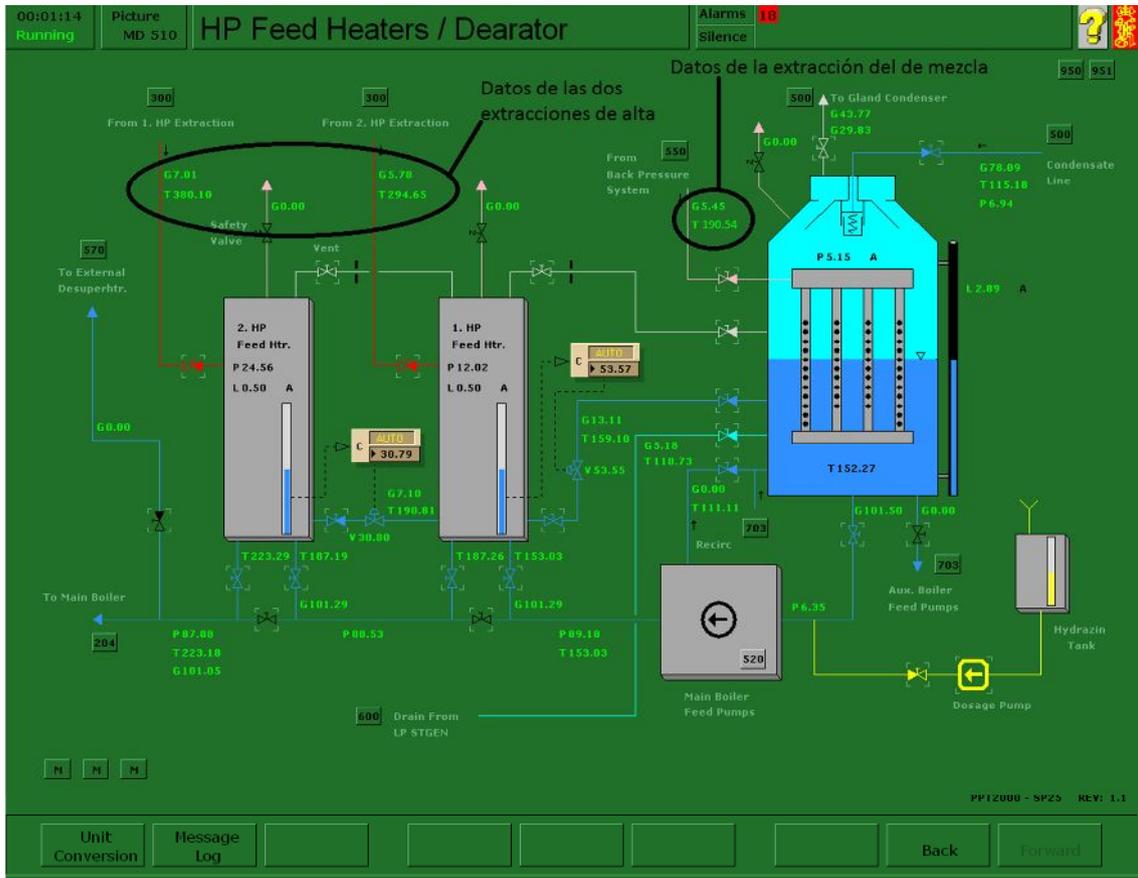
Una vez se tengan definidos los ciclos T-S se procederá a completar la tabla con la hoja de cálculo, en el caso de la instalación con únicamente precalentadores, se tuvo que aplicar la teoría de Haywood, ya que los valores que proporciona el simulador de estudio eran las temperaturas de las

extracciones (Imagen 6.8 y 6.9). Se pensó también en usar Igual salto de temperatura: donde se procedería de la misma forma que en el caso de Haywood, pero, usando temperatura y no las entalpías, pero se descartó porque los valores de las temperaturas de extracciones se alejaban de las que se obtenían en el simulador.

Usando la teoría de Haywood [8], se divide la diferencia de entalpía entre el punto 4 y 3 del ciclo en tantas partes como extracciones se hubieran realizados, siendo esta división en partes iguales. Como se puede ver en la imagen 6.10.

Después de tener el valor de la entalpía en cada extracción, se comprobó que estos valores de entalpía correspondían con la temperatura que se obtuvieron del simulador, o se aproximaba

Imagen6.8: Temperaturas Intercambiadores de alta y de mezcla

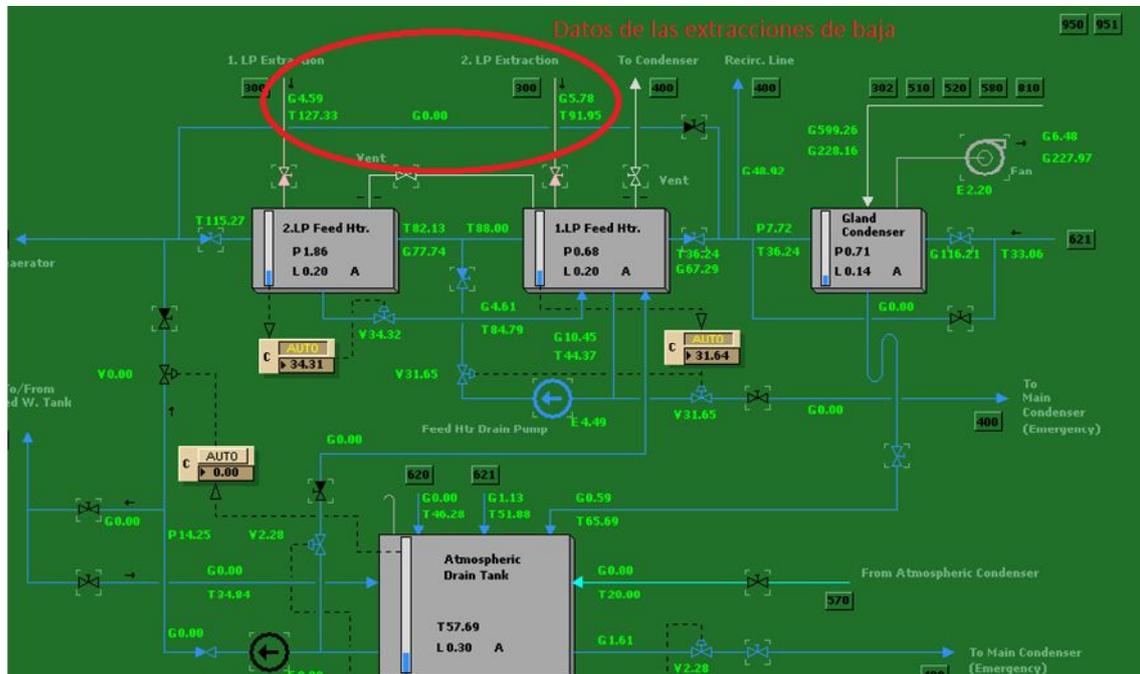


Fuente: Captura Simulador SP25

En la imagen 6.8 se puede observar:

- Intercambiador 1 = 380.10°C
- Intercambiador 2 = 294.65°C
- Intercambiador 3 (Mezcla) = 190.54°C

Imagen 6.9: Temperaturas Intercambiadores de baja



Fuente: Captura Simulador SP25

En la imagen 6.9 se puede ver:

- Intercambiador 4=127.33°C
- Intercambiador 5= 91.95°C

Para los casos en los que además de precalentadores se disponía de placas solares, se usaron las mismas presiones de extracción. Lo único que varía en función al caso normal serían las fracciones másicas correspondientes, ya que al precalentar el agua también con las placas, no sería necesario tanto caudal de extracción como en el caso normal

w_{Bomb} , usando en este caso las siguientes expresiones:

$$w_{BombN} = (h5 - h3) + (h53 - h43)$$

$$w_{BombM} = (h5 - h3) + (h53 - h43)$$

$$w_{BombP} = (h5 - h3) + (h53 - h43)$$

Q_{abs} , utilizando estas expresiones:

$$Q_{absN} = (h1 - h51)$$

$$Q_{absM} = (h1 - h51)$$

$$Q_{absP} = (h1 - h51)$$

ter, se usarán las siguientes fórmulas:

$$\eta_{terN} = 100 * \left(\frac{w_{TurbN} - w_{BombN}}{Q_{absN}} \right)$$

$$\eta_{terM} = 100 * \left(\frac{w_{TurbM} - w_{BombM}}{Q_{absM}} \right)$$

$$\eta_{terP} = 100 * \left(\frac{w_{TurbP} - w_{BombP}}{Q_{absP}} \right)$$

Para finalizar, se multiplica el trabajo de la turbina por el caudal de vapor que se genera, comprobando de esta forma si la potencia que se genera es la que se necesita en la planta.

6.2.4. Cálculo del gasto de combustible en las instalaciones

Una vez se tiene el balance energético se utilizan una serie de fórmulas para calcular el gasto de combustible que genera la caldera.

$$B = \frac{P_{Turb}}{\eta_{efec} * PC}$$

Donde cada parte de la fórmula equivale a:

- B, siendo el gasto de combustible.
- P_{Turb} , es la potencia de la turbina.
- η_{efec} , Es el rendimiento efectivo de la instalación, el cual resulta de la multiplicación de todos los rendimientos de la planta, en este caso el rendimiento térmico además del rendimiento de la propia turbina de vapor que se supondrá del 0.90.
- PC, Poder calorífico.

En el caso de tener solo precalentadores se usarán las formulas directamente, en el caso del mixto o solo placas solares, se tiene que tener en cuenta que no todos los días se podrán usar las placas, así como las horas que se tiene sol durante el día. Para los cálculos se ha considerado que se habrán 9 horas al día y 200 días al año, teniendo en cuenta que el gasto de combustible no es el mismo usando las placas que los precalentadores.

Por último, se buscará el precio del combustible más actual y se procederá a calcular cuanta diferencia económica hay entre un caso y otro, concluyendo al final que opción es más viable, y si se puede aplicar. En este caso se eligió 300€ la tonelada

6.2.5. Cálculo de la potencia calorífica

Para poder definir qué placas solares serían las más adecuadas en nuestro estudio, es necesario calcular previamente la potencia calorífica que generan los intercambiadores, para poder establecer la cantidad de placas solares que se necesitarían para igualar la acción de estos.

Para poder calcularlo es necesario tener calculados las entalpías de los diferentes puntos termodinámicos. Las dos posibles ecuaciones que se usarían para los cálculos son:

- El primer caso es el que más datos deberíamos tener para poder calcularlos.

$$P_{cal} = 4.187 * Q_{vapor} * (T_s - T_e)$$

- El segundo caso sería el más directo

$$P_{cal} = Q_{vapor} * (h_s - h_e)$$

Como se puede observar el caudal de vapor correspondería a la cantidad de vapor que circula en ese momento por ese intercambiador, y en un caso se usarán las temperaturas y en otras las entalpías.

Los cálculos se harán en el sistema normal sin placas, para posteriormente intentar igualar ese valor con las placas solares.

En nuestro caso se usarán dos formas, en una se intentará sustituir completamente la potencia de los intercambiadores con placas, y en el otro caso se intentará solo abarcar la mitad de la potencia calorífica.

Cuando se abarque la distribución mixta, será necesario calcular la entalpía de salida de los intercambiadores, ya que, al no generar la potencia entera, sino la mitad como ya se ha explicado anteriormente, este valor cambia. Para poder obtenerlo será necesario despejar de las fórmulas anteriores el valor de la entalpía de salida, ya que el de la entrada se mantiene constante, así como el caudal de vapor.

6.2.6. Utilización de la energía solar

Debido a que los barcos se pueden considerar como una industria, estos requieren de elementos calientes como puede ser el agua, vapor, etc. Por ello el calor que produce la radiación solar se puede utilizar como 2 opción en vez de quemar combustibles fósiles.

Gracias a esta forma de obtener el calor necesario, se obtendrán una serie de ventajas las cuales facilitarán el desempeño del trabajo:

- **Ventajas económicas.**
- **Mejora de la competitividad.**
- **Ventajas medioambientales.**
- **Mejora de las condiciones de trabajo.**

Pero la implantación de esta energía no es algo que se realice a la ligera, ya que se tienen que tener en cuenta diversos cálculos para obtener e implantar la instalación que más se adapte a nuestras necesidades. Lo más representativo sería:

- **Cálculo de la superficie colectora.** Para realizar este cálculo correctamente, sería necesario intentar que la aportación solar genere la totalidad de la energía consumida. Para ello hay que tener en cuenta la incidencia de la radiación solar, la zona ambiental en la que funcionarán, posibles objetos que causen sombras, etc.

- **Cálculo del rendimiento de un colector.** Este rendimiento esta proporcionado, ya sea por una tabla o por una fórmula, que da el fabricante. Para ello hay q tener en cuenta diferentes factores como la incidencia de la radiación, las pérdidas del colector, la temperatura ambiente, etc.
- **Cálculo de la cantidad de energía recibida en el panel.** Para poder obtener una estimación se tendrá en cuenta la localización geográfica donde operen las placas, la inclinación de los paneles solares, etc. Además, se consultarán una serie de tablas en las que estará reflejado la radiación según la zona y el mes.
Por lo tanto, si se divide la energía que se necesita entre la energía que se obtiene de este cálculo se obtendrá el número de placas.
- **Cálculo para la optimización en la orientación e inclinación de las placas.**
- **Determinación de las pérdidas generadas por la sombra.**

6.2.7. Información sobre placas solares

Dentro de las placas se pueden distinguir dos grandes grupos: las placas solares fotovoltaicas y las placas solares térmicas.[9]

La diferencia básica entre ellas radica en el tipo de energía que producen. Mientras que las placas fotovoltaicas transforman la energía solar en energía eléctrica, las placas térmicas consisten en el aprovechamiento de la energía solar para generar calor y calentar agua u otros elementos, que se usarán para diversos objetivos.[9]

Para entender el mecanismo por el que la energía procedente del sol es transformada en energía térmica, es esencial describir el equipamiento que se utiliza para el proceso.[9]

El elemento central es la placa solar térmica, también llamada colector solar, que es el captador de los rayos solares. Aunque hay varios tipos, dependiendo de su aplicación, los colectores más sencillos están formados por una superficie de vidrio que protege a unos tubos metálicos por los que pasa un fluido. Los rayos de sol atraviesan fácilmente el vidrio y llegan a la denominada capa absorbente, formada por materiales diseñados para que tengan unas propiedades físicas que les permitan absorber calor y no emitirlo. Esta placa está en contacto con los tubos que contiene el fluido que se quiere calentar que, posteriormente, es conducido hacia un tanque de acumulación.[9]

En este sistema son también fundamentales los sistemas de aislamiento que se encuentran en la propia cubierta de vidrio y en los canales de aire que se distribuyen en el interior del sistema.[9]

Los captadores solares, como núcleo de las instalaciones solares térmicas, deben cumplir unos requisitos mínimos de calidad, los cuales vienen aportados por el propio fabricante o bien a partir de unas pruebas que se realizan en laboratorios cualificados. Las características que hay que conocer son:

- Superficie útil de captación.
- Peso
- Instrucciones de transporte y manipulación del captador.
- Capacidad y tipo de líquido transportador del calor recomendado por el fabricante.
- Caudales recomendados y pérdidas de carga.
- Presión máxima de servicio y presión de prueba.
- Materiales de constitución del absorbedor y del circuito del líquido.
- Materiales de constitución de la cubierta y de la caja.
- Sistema de sellado.
- Tipos y espesores del aislamiento.

- Temperatura de estancamiento.
- Requisitos para el mantenimiento.

Los captadores operan aplicando una serie de propiedades físicas, las más relevante son:

1. **Características físicas del absorbedor.** La radiación solar incidente es parcialmente absorbida por los cuerpos. El resto es reflejada o los atraviesa.

La relación entre estos efectos depende de: La naturaleza del cuerpo, El estado de la superficie, El grueso del cuerpo, La longitud de onda y El ángulo de incidencia de los rayos solares.

Los cuerpos oscuros y mates captan mejor la radiación solar que cualquier otro color; por eso el absorbedor del captador solar suele ser de colores oscuros, para aprovechar al máximo la radiación solar.[12]

2. **El efecto invernadero.** Este efecto se genera en algunos cuerpos transparentes, que normalmente sólo son atravesados por radiaciones con longitud de onda entre 0,3 y 3 micras. Dado que la mayor parte de la radiación solar está comprendida entre 0,3 y 2,4 micras, la luz solar puede atravesar un vidrio. Una vez atravesado, la radiación encuentra el absorbedor, que se calienta por la radiación solar y emite radiaciones comprendidas entre los 4,5 y 7,2 micras para las que el vidrio es opaco. [12]

Esta radiación que no puede salir es reflejada hacia el interior de nuevo. Una parte de esta energía calienta el vidrio y el cristal la remite hacia dentro y hacia fuera. [12]

3. Aislamiento. El tercero de los principios físicos que intervienen en el funcionamiento de los captadores es el aislamiento del conjunto respecto del exterior, formado normalmente por un revestimiento interno de la caja contenedor. [12]

Al mismo tiempo en este apartado se comentaran brevemente los tipos de placas térmicas que más favorecerían el caso estudiado. En primer lugar se hablará de los captores solares de cilindro parabólicos o sistemas solares de concentración estos están diseñados especialmente para obtener altas temperaturas. Su principio de funcionamiento se basa en la proyección de toda la radiación incidente de una superficie reflectante sobre un punto concreto. [12]

Los captadores están formados por unas conducciones con un revestimiento selectivo que recorren longitudinalmente el captador y que actúan de absorbedor. [12]

Estas conducciones reciben la radiación solar reflejada por las paredes curvas que las rodean, logrando así una cantidad de energía superior por unidad de superficie de absorbedor (W / m^2). El resultado de todo ello es un captador capaz de generar temperaturas altas hasta $200^{\circ}C$ con niveles estándares de radiación. [12]

En segundo lugar se comentará los captadores solares de tubos de vacío, Este captador consta de un conjunto de tubos cilíndricos, formados por un absorbedor selectivo, situado sobre un asentamiento reflector y rodeado de un cilindro de vidrio transparente. [12]

Entre el tubo exterior transparente y el absorbedor interior se ha hecho el vacío. Con ello, se evita las pérdidas por conducción y por convección desde

la superficie absorbente y este hecho permite alcanzar temperaturas de más de 100°C y aprovechar mucho más la radiación solar. [12]

Por último se hablará en este apartado de la conexión de los captadores, los cuales pueden ser en paralelo, en serie o mixto.

- **En serie.** En la conexión en serie, la salida del primer captador se conecta directamente con la entrada del siguiente, y así consecutivamente. La temperatura del fluido de entrada a cada captador es superior a la del captador precedente, por lo que a la salida de un grupo de captadores podemos obtener temperaturas más altas que si trabajáramos con el salto térmico de un solo captador. [12]

Este tipo de conexión tiene el inconveniente de que el rendimiento de los captadores va disminuyendo proporcionalmente con el aumento de la temperatura de trabajo; por tanto, esta tipología de conexión, únicamente se utiliza en aplicaciones muy particulares, y con un máximo de 6 a 10 m² de captadores conectados en serie, según la zona climática. [12]

En cuanto al comportamiento hidráulico de esta configuración, el caudal total del grupo de captadores será el equivalente al caudal de un solo captador y, por el contrario, la pérdida de carga provocada por el grupo será el equivalente a la suma de la pérdida de carga de todos los captadores.

- **En paralelo.** En la conexión en paralelo, tanto la salida como la entrada de los captadores están conectadas a puntos de entrada y salida comunes al resto de captadores. [12]

Con esta configuración, la temperatura del fluido de entrada es la misma en todos los captadores y pasa lo mismo con las temperaturas de salida, de forma que a la salida de la batería o el grupo de captadores obtenemos la temperatura como si trabajáramos con el salto térmico de un solo captador. [12]

Por lo tanto, todos los captadores trabajan en el mismo punto de la curva de rendimiento. Esta conexión es la más habitual en las instalaciones solares térmicas de baja temperatura.

Hidráulicamente, esta configuración nos presenta un caudal total del grupo, que equivale a la suma de los caudales parciales de cada captador, mientras que la pérdida de carga del grupo, será el equivalente a la de un solo captador. [12]

Otro dato importante es el rendimiento, este es la relación entre la totalidad de radiación recibida y el aprovechamiento efectivo transmitido al absorbedor del captador solar constituye la eficiencia. [11]

Así la transformación de la radiación del Sol en energía térmica lleva asociada unas pérdidas por radiación, convección y conducción que determinan el rendimiento del sistema de captación. [11]

Así el rendimiento (η) quedará determinado por esta diferencia [11]

$$\eta = \frac{Q_u}{I \cdot A} = \frac{I_0 - k_1 \cdot (T_m - T_a)}{I}$$

Siendo cada elemento lo siguiente:

η_0 = rendimiento óptico. Denominado por los fabricantes como factor de eficiencia, o factor de ganancia o como rendimiento óptico, los catálogos del producto han de informar de sus características.

T_m = temperatura interior del colector (temp. flujo)

T_a = temperatura exterior (ambiental)

I = radiación incidente total sobre el colector (W/m^2)

k_1 = factor de corrección por pérdidas térmicas

Además los rendimientos de las placas varían dependiendo del tipo de captadores solares que utilice. El rendimiento de la mayoría de los captadores solares ronda el 80%. [10]

Los paneles solares térmicos, deben haber sido certificados por un laboratorio de ensayos homologado de acuerdo a la norma UNE-EN 12975-2:2006, obteniendo como resultado la curva de rendimiento energético. Generalmente, los laboratorios pueden aportar dos tipos de curvas. Una se denomina curva lineal (curva de primer orden), y la otra curva cuadrática (curva de segundo orden). [13]

En esta ocasión se tomará como referencia la curva de primer orden, explicando con algunos ejemplos como se interpreta y que nos aporta. Para poder llevarlo a cabo lo primero es convertir la fórmula del rendimiento que hemos visto en este apartado y transformarla en una lineal, quedando de la siguiente forma [13]:

$$= \eta_0 - k_1 \cdot X$$

Los datos que más relevantes que nos puede aportar el fabricante son:

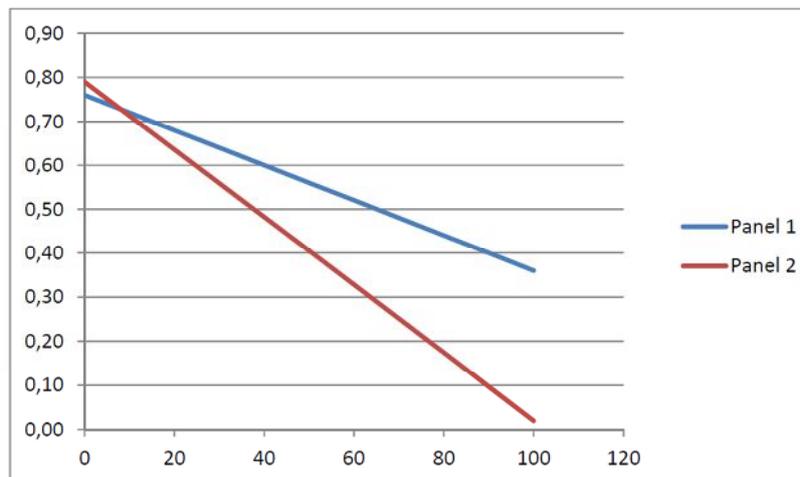
- τ_0 = Factor óptico (Eficiencia máxima. Corte de la curva con el eje Y). Cuando el panel no pierde calor hacia el entorno, sólo son determinantes, para la eficiencia, las pérdidas ópticas. La diferencia entre la temperatura media del fluido transportador de calor y la temperatura ambiente es cero. [13]
- k_1 = Coeficiente de pérdidas lineal (Pendiente de la recta) [13]

Para entenderlo mejor se explicarán dos ejemplos, uno con un día soleado y otro con un día nublado, cambiando al mismo tiempo los valores de los datos más relevantes que hemos citado anteriormente.

El primer panel tendrá un factor óptico igual a 0.76 y un coeficiente de pérdidas igual a $3.20\text{W/m}^2\text{K}$ y el segundo un factor igual a 0.79 y un coeficiente de pérdidas igual a $6.16\text{W/m}^2\text{K}$. [13]

El primer ejemplo es el día soleado 800W/m^2 :

Imagen 6.11: Comparativa paneles día soleado

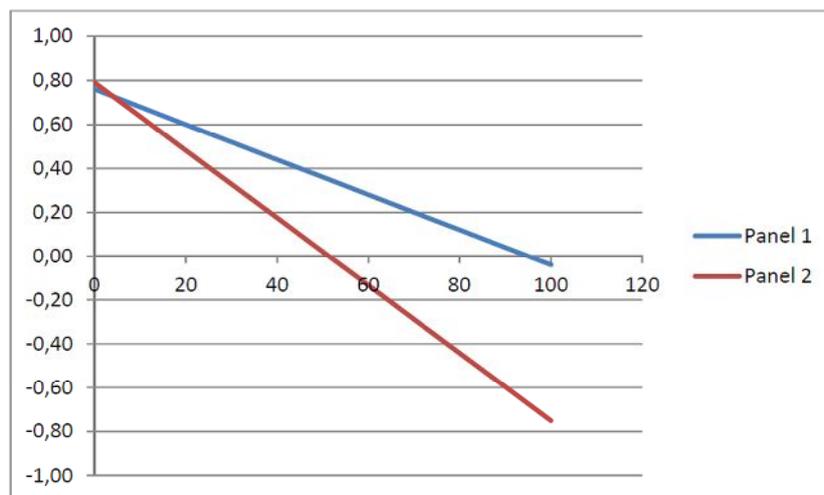


Fuente: Página Web [13]

Eje X igual a la diferencia de temperatura del panel y la temperatura ambiente y el eje Y es el rendimiento. Como se puede observar en la imagen 6.11 la pendiente es un equivalente de las pérdidas, es decir, cuando menos pendiente tenga será lo mismo que decir que tiene menos pérdidas

El segundo ejemplo es el día nublado $400\text{W}/\text{m}^2$:

Imagen 6.12: Comparativa paneles día nublado



Fuente: Página Web [13]

Eje X igual a la diferencia de temperatura del panel y la temperatura ambiente y el eje Y es el rendimiento. En la imagen 6.12, se puede observar que el panel 1 aun siendo un día nublado, sigue aportando rendimiento a temperaturas altas, mientras que el panel 2 dejar de tener rendimiento en torno a los 45°C .

Por lo tanto basándonos en estos dos ejemplos se puede concluir que el rendimiento de una placa solar dependerá de [13]:

- Del coeficiente de pérdidas, aportado por el fabricante (materiales de fabricación).
- De las condiciones climatológicas dadas por la radiación y la temperatura ambiente.
- De las condiciones de trabajo, dadas por la temperatura interna de la placa.
- Y aunque no aparece reflejado, de la zona geográfica que nos encontremos, ya que la radiación solar varía.

Otro dato importante que se tiene que tener en cuenta es el tamaño del panel solar térmico, el cual varía según las condiciones de radiación solar de la zona donde vaya a operar. Si el sistema va a ser utilizado durante todo el año, lo mejor será basarse en los datos de radiación de invierno para calcular correctamente la dimensión del panel. Dependiendo de la latitud se tendrá que adaptar la orientación e inclinación de los paneles solares térmicos para obtener el mayor rendimiento posible.[10]

Sabiendo todo lo anterior, lo primero es decidir qué nivel de temperatura es a la que operamos, en nuestro caso será aquella que abarque la temperatura de trabajo de la caldera, siendo en nuestro caso de 236 °C.

1. El primero es el, PTC 1000 - Modular parabolictroughcollector (Imagen 6.13), opera entre las temperaturas de 150 y 300 °C. Este colector tiene un área de apertura con un ancho de 1 metro y una longitud de 2 metros, generando una potencia de 1 kW aproximadamente.

Además, la instalación por placa tiene un valor de 150 €.

Imagen 6.13: Placa solar PTC 1000 - Modular parabolic trough collector



2. El segundo ejemplo sería el FASOL (Imagen 6.14), El diseño inicial del colector FASOL fue basado en el uso de espejos de vidrio delgado (1,2 mm de espesor) como reflectores en una estructura parabólica compuesta.

La potencia que genera está en torno a 1 kW, con unas dimensiones igual a, una apertura de 2,62 m, una distancia focal de 0.7 m y una longitud de 6 m. El rango de temperatura en el que opera es entre 130 y 300 °C y con un coste de unos 150 € por metro cuadrado.

Imagen 6.14: Placa solar FASOL



Para poder realizar los cálculos, fue necesario elegir un tipo de placa en concreto, en este caso se eligió y se trabajó con el correspondiente a la imagen 6.13, correspondiente a la placa solar PTC 1000 - Modular parabolic trough collector puesto que, aunque en ambos casos el precio por metro cuadrado era el mismo, en el primero las medidas eran más acorde al espacio que se disponía.

6.2.8. Presupuesto placas solares

En este apartado intentaremos calcular el periodo de amortización de las dos disposiciones que generan un ahorro de combustible, para ello es necesario conocer diferentes datos como el gasto de combustible, el precio de este, etc. La primera disposición que vamos a estudiar es la que está compuesta únicamente de placas solares.

Lo primero es recoger en una tabla los datos que nos facilitaran los cálculos para presupuestar la instalación.

Tabla 6.4: Ahorro Combustible

	Instalación Normal	Instalación Placas
Gasto de Combustible Anual	63713.76 Toneladas	61615.67 Toneladas
Ahorro de combustible	-	2098.09 Toneladas
Precio del Fuel	300€	300€
Gasto Económico Anual	19114128€	18484701€
Ahorro Económico Anual	-	629427€

Fuente: Propia

Tabla 6.5: Conste Placas Solares

	Intercambiador 1	Intercambiador 2	Intercambiador 4	Intercambiador 5
Poder Calorífico	4205.62	4153.82	3312.44	3326.46
Cantidad de Placas	4000	4000	3000	3000
Precio Placas	150€	150€	150€	150€
Total Precio	600000€	600000€	450000€	450000€
Total conste	2100000,00€			

Fuente: Propia

Después de comparar las dos tablas se puede concluir que se necesitarían unas 14000 placas para sustituir el funcionamiento de los intercambiadores en las horas de sol. Esta instalación supondría un gasto de unos 2 millones de euros, amortizando este gasto en unos tres años y medio gracias al ahorro que obtendríamos con el combustible.

La segunda disposición que vamos a estudiar es la que está compuesta tanto de placas como intercambiadores.

Lo primero es recoger en una tabla los datos que nos facilitaran los cálculos para presupuestar la instalación.

Tabla 6.6: Ahorro Combustible

	Instalación Normal	Instalación Placas
Gasto de Combustible Anual	63713.76 Toneladas	62935.91Toneladas
Ahorro de combustible	-	777.85Toneladas
Precio del Fuel	300€	300€
Gasto Económico Anual	19114128€	18880773€
Ahorro Económico Anual	-	233355€

Fuente: Propia

Tabla 6.7: Conste Placas Solares

	Intercambiador 1	Intercambiador 2	Intercambiador 4	Intercambiador 5
Poder Calorífico	2000 kJ/kg	2000 kJ/kg	1200 kJ/kg	1200 kJ/kg
Cantidad de Placas	2000	2000	1200	1200
Precio Placas	150€/m ²	150€/m ²	150€/m ²	150€/m ²
Total Precio	300000€	300000€	180000€	180000€
Total conste	960000,00€			

Fuente: Propia

Después de comparar las dos tablas se puede concluir que se necesitarían unas 6400 placas para sustituir el funcionamiento de los intercambiadores en las horas de sol. Esta instalación supondría un gasto de unos 960000 euros, amortizando este gasto en unos 4 años medio gracias al ahorro que obtendríamos con el combustible.

En todos estos cálculos hay que tener en cuenta que estamos usando un tipo en concreto de placas, quizás haya algún tipo de placas que aporte más poder calorífico, otra posibilidad es que al hacer el pedido como es tanta cantidad apliquen algún descuento.

El tiempo en la zona geográfica también es un factor a tener en cuenta, ya que esta los cálculos son aproximados, al igual que el valor del precio del fuel. Por último decir que aunque es viable, no se puede aplicar por falta de espacio como ya se había comentado, aun así los datos son bastantes favorables, por lo que en una instalación más pequeña sería rentable.

6.3. Metodología

Para realizar este trabajo, fue necesario usar varios puntos:

1. Se necesitó un planteamiento inicial: cuando se tuvo claro más o menos que tema abarcar se realizó una reunión con el profesor que llevaría el TFM, acordando el buque de estudio, los cálculos que se emplearían, el tipo de trabajo que sería etc.
2. Estudio de la instalación, así como los diferentes ciclos: los datos de partida del trabajo, se consiguieron usando el simulador SP25. Para poder obtenerlos fue necesario levantar la planta de vapor y llevarla a un régimen nominal de producción de vapor y operando al 100 por 100. Los valores que se obtienen son las presiones correspondientes a las extracciones, además usando estos datos

más la teoría de Haywood se logró obtener también las entalpías correspondientes a las presiones.

3. Cálculo de los parámetros térmicos de los ciclos resultantes de las diferentes disposiciones, empleando las siguientes herramientas: libreoffice, Wmaxima y DIA.
4. Después de tener todos los puntos termodinámicos de los ciclos, se calcularon los diferentes rendimientos térmicos de estos, para ello fue necesario obtener previamente la potencia generada por la turbina, así como la potencia necesaria para las bombas.
5. Se realizaron los cambios correspondientes para los diferentes estudios. En este caso se tendrán 3 disposiciones, una solo con precalentadores, otra solo con placas solares y por último una mixta.
6. Cuando ya se tuvieron definidas las disposiciones se analizaron como ya se ha dicho los rendimientos térmicos, las potencias de las turbinas y de las bombas, así como la potencia calorífica que tendrían que afrontar las placas solares para sustituir los precalentadores. En todos los cálculos solo se tuvieron en cuenta las potencias y el rendimiento intrínseco de la turbina, dejando a un lado las diferentes pérdidas térmicas que puede generar una instalación de vapor.
7. Cálculo del gasto de combustible: Se llevó a cabo el gasto de combustible de las tres opciones, teniendo en cuenta en la parte de las placas solares, las horas de luz al día, así como días en los que no será posible el uso de las placas.

8. Análisis numérico de los datos, tabulándolos y comparándolos entre sí para obtener las conclusiones oportunas. En este apartado se comparan las diferentes potencias de la turbina, el caudal de vapor que se necesita para generar dicha potencia, el gasto de combustible que supone y en consecuencia el ahorro económico que supondría una mejora en la eficiencia de la instalación.

7. APLICACIÓN PRÁCTICA

En este capítulo recopilaremos todos los resultados obtenidos en los diferentes cálculos realizados a lo largo del estudio. Para ello se agruparán en una serie de tablas, que permitirán observar de manera más detallada y directa las diferencias que hay entre una distribución y otra.

Lo primero que se tabula en este apartado son las diferentes fracciones másicas que se obtuvieron en las instalaciones, como se ve retejado en el siguiente cuadro.

Tablas7.1: Fracciones másicas

Fracciones másicas	Instalación Normal	Instalación Placas	Instalación Mixta
m1	0.0844		0.054
m2	0.0769		0.049
m3	0.0542	0.08	0.063
m4	0.0696		0.055
m5	0.0653		0.044

Fuente: Propia

En este caso las diferentes fracciones másicas no llevan unidad.

Como podemos observar en la tabla 7.1 las fracciones másicas que se requieren para el precalentamiento de los intercambiadores, varían de una distribución a otra, donde más varía es al comparar la distribución de solo precalentadores y la mixta, puesto que poseen el mismo número de intercambiadores. En el caso de solo intercambiadores las fracciones son más elevadas ya que es necesario calentar el agua hasta cierta temperatura, mientras que en el mixto parte de ese aumento de temperatura lo realizan las placas, lo que se traduce en una disminución de las fracciones másicas en cada extracción.

Si hablamos de la distribución solo con placas, únicamente tendríamos el intercambiador de mezcla que funciona como desgasificador.

Después de estos cálculos se rellenará la tabla con las características termodinámicas de los diferentes puntos estudiados, para seguir con el balance térmico y con los otros cálculos.

Tabla 7.2: Características termodinámicas Instalación Normal

Punto	Presión (Bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)	Entropía (kJ/kg°C)
1	58,72	480,10	3377,06	6,8317
2	0,03	24,08	2026,25	6,8317
2_1	31,62	381,47	3186,16	6,8317
2_2	14,53	273,90	2981,02	6,8317
2_3	5,43	161,98	2768,54	6,8317
2_4	1,53	111,92	2545,74	6,8317
2_5	0,29	68,14	2298,68	6,8317
3	0,03	24,08	100,99	0,3547
3_1=4_3	5,43	154,99	653,74	1,8923
4_1	31,62	236,77	1022,24	2,6725
4_2	14,53	196,81	837,99	2,3005
4_4	1,53	111,92	469,49	1,4398
4_5	0,29	68,15	285,25	0,9323
5	5,43	24,11	101,63	0,3547
5_1	58,72	236,77	1022,50	2,6664

5_2	58,72	196,81	839,92	2,2939
5_3	58,72	155,58	659,58	1,8923
5_4	5,43	111,92	469,80	1,4396
5_5	5,43	68,15	285,67	0,9320
6_1	14,53	196,81	1022,24	2,6926
6_2	5,43	154,99	837,99	2,3226
6_3	0,29	68,15	469,49	1,4721
6_4	0,03	24,08	285,25	0,9742
4	58,72	274,18	1206,50	3,0144

Fuente: Propia

La tabla 7.2 recoge todos los puntos termodinámicos de la instalación donde únicamente operan los precalentadores, los valores que aparecen reflejados se obtienen a partir de algunos valores del simulador y de la herramienta que recoge las características termodinámicas del agua, incluida en la hoja de cálculo del libre office.

Tabla 7.3: características Termodinámicas Instalación placas

Punto	Presión (Bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)	Entropía (kJ/kg°C)
1	58,72	480,10	3377,06	6,8317
2	0,03	24,08	2026,25	6,8317
2_1	5,43	161,98	2768,55	6,8317
3	0,03	24,08	100,99	0,3543
5	5,43	24,09	101,53	0,3543
5_1	5,43	68,15	285,67	0,9320
5_2	5,43	111,93	469,80	1,4396
5_3	5,43	154,97	653,75	1,8923
5_4	58,72	155,60	659,58	1,8925
5_5	58,72	196,82	839,92	2,2939
5_6	58,72	236,75	1022,50	2,6664
4	58,72	274,18	1206,50	3,0145

Fuente: Propia

En la tabla 7.3 los datos se han calculado a partir de la disposición donde solo operan las placas solares, para ello se ha conservado la presión de los puntos 1 y 2, así como la temperatura y entropía del punto 1 de la tabla 7.1. Para el resto de valores se calculó la potencia calorífica que tenían que igualar las

placas y se completó el resto de puntos con la herramienta del libre office, como en el caso anterior.

Tabla 7.4: Características termodinámicas Instalación mixta

Punto	Presión (Bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)	Entropía (kJ/kg°C)
1	58,72	480,10	3377,06	6,8317
2	0,03	24,08	2026,25	6,8317
2_1	31,62	381,47	3186,16	6,8317
2_2	14,53	273,90	2981,02	6,8317
2_3	5,43	161,98	2768,54	6,8317
2_4	1,53	111,92	2545,74	6,8317
2_5	0,29	68,14	2298,68	6,8317
3	0,03	24,08	100,99	0,3543
3_1=4_3	5,43	154,97	653,74	1,8923
4_1	31,62	236,79	1022,24	2,6725
4_2	14,53	196,80	837,99	2,3005
4_4	1,53	111,92	469,49	1,4398
4_5	0,29	68,14	285,25	0,9323
5	5,43	24,09	101,53	0,3543

5_1	58,72	236,79	1022,59	2,6667
5_2	58,72	196,80	839,88	2,2937
5_3	58,72	155,58	659,58	1,8923
5_4	5,43	111,92	469,77	1,4395
5_5	5,43	68,14	285,67	0,9320
6_1	14,53	196,80	1022,24	2,6926
6_2	5,43	154,97	837,99	2,3226
6_3	0,29	68,14	469,49	1,4721
6_4	0,03	24,08	285,25	0,9742
7_1	5,43	56,73	237,91	0,7897
7_2	5,43	100,61	422,00	1,3136
7_3	58,72	182,09	774,74	2,1531
7_4	58,72	222,78	957,46	2,5371
4	58,72	274,18	1206,50	3,0145

Fuente: Propia

En la tabla 7.4 los puntos a calcular fueron más que en la tabla 7.1, esto es debido a que además de la entrada y salida de los intercambiadores, también se tuvo q tener en cuenta la entrada y salida al grupo de placas solares. Para llevar a cabo el proceso de cálculos, se mantuvieron iguales las presiones del punto 1 y 2, así como la de todas las extracciones de la turbina,

correspondientes a la tabla 7.1. Esto se hizo para facilitar en cierta forma los cálculos y la comparativa entre ambas instalaciones.

Una vez se tienen todos los puntos, se procederá a calcular los diferentes trabajos del ciclo, rendimientos, etc. Los cuales están recogidos en las siguientes tablas:

Tabla 7.5: Cálculos Termodinámicos Ciclos

Calculo	Ciclo Normal	Ciclo Placas	Ciclo Mixto
Trabajo turbina (kJ/kg)	1085.35	1291.41	1153.5
Trabajo de la bomba (kJ/kg)	6.26	6.38	6.29
Calor absorbido (kJ/kg)	2354.56	2354.56	2354.56
Rendimiento Térmico	45.83	55	48.72

Fuente: Propia

En esta tabla, la 7.5, se recogen los cálculos más representativos de la instalación. En primer lugar tenemos el trabajo de la turbina, al comparar los tres ejemplos entre sí, se observa que el trabajo más elevado se consigue en el caso de solo placas, esto es debido a que no se realizan extracciones de la turbina, utilizándose todo el vapor para generar trabajo, al comparar los otros dos ejemplos, el mixto es el que obtiene el valor más alto, esto es debido a que se usa una cantidad de vapor menor para el precalentamiento, por lo que llegará más vapor a la turbina para generar trabajo.

En segundo y tercer lugar tenemos el calor absorbido y el trabajo de las bombas, estos valores en los tres casos se mantienen prácticamente iguales, esto es debido a que los puntos que se utilizan para los cálculos no varían.

Y por último tenemos el rendimiento térmico, el cual será mayor en proporción al valor del trabajo de la turbina, es decir, como el calor absorbido es constante, cuanto mayor sea el trabajo de la turbina, mayor será el rendimiento. Al comparar los 3 ejemplos, se observa que el mayor es el de las placas, seguido del mixto.

Teniendo ya estos datos pudimos pasar al cálculo de gasto de combustible.

Los valores que se usaron para los cálculos fueron:

- Una potencia en el eje de la turbina de 25000kW
- Un poder calorífico del combustible de 30000kJ/kg
- Un coste económico del combustible igual a 300 euros la tonelada

Tabla 7.6: Gasto de combustible

Cálculos	Ciclo Normal	Ciclo Placas	Ciclo Mixto
efec	0.41	0.49	0.43
Gasto de Combustible (kg/s)	2.02	1.7	1.9
Gasto de combustible diario (T/día)	174.56	164.07	170.67
Gasto de combustible Anual (T/año)	63713.76	61615.67	62935.91
Ahorro de combustible (T/año)	-	2098.09	777.85
Coste anual Combustible (€)	19114128	18484701	18880773
Ahorro anual (€)	-	629427	233355

Fuente: Propia

En la tabla 7.6 se recogen los valores obtenidos durante el cálculo de gasto de combustible. En primer lugar se tiene el rendimiento efectivo, producto entre el rendimiento de la turbina y el rendimiento térmico, como el rendimiento de la turbina es constante, el rendimiento efectivo será el mayor en la propuesta que tenga mayor rendimiento térmico, en nuestro caso en la correspondiente al compuesto de solo placas. Seguidamente se procede al cálculo del gasto de combustible, siendo mayor en aquel donde se genere más vapor debido a las extracciones de la turbina, si se comparan las tres propuestas, la instalación normal es la que más gasta. Al realizar una serie de conversiones al gasto de combustible, fue posible calcular cuánto supondría

económicamente este gasto, para seguidamente poder calcular el ahorro que se obtendría con la utilización de las otras dos propuestas.

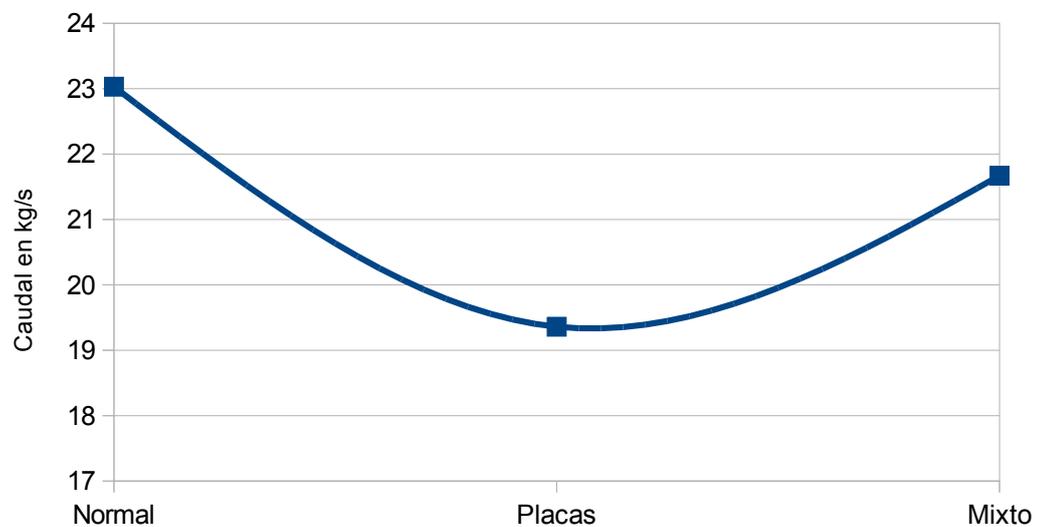
Tabla 7.7: Potencia calorífica

Calculo	Inter. 1	Inter. 2	Inter. 4	Inter. 5
Potencia Calorífica (kJ/kg)	4205.62	4153.82	3312.44	3326.46

Fuente: Propia

En la tabla 7.7 se recoge la potencia calorífica que generan los intercambiadores, para poder tener una idea de la cantidad de potencia que tendrían que generar las placas solares para sustituir el sistema de solos precalentadores

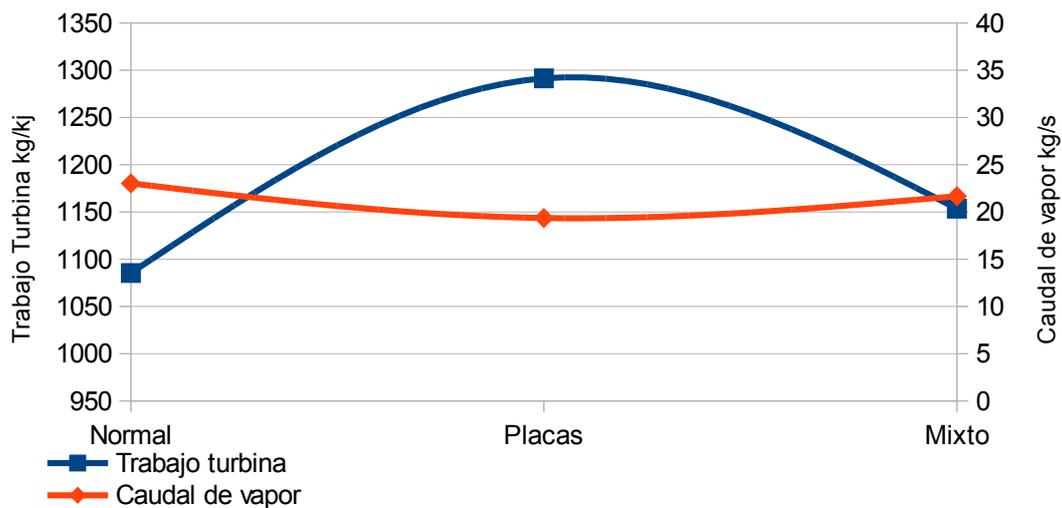
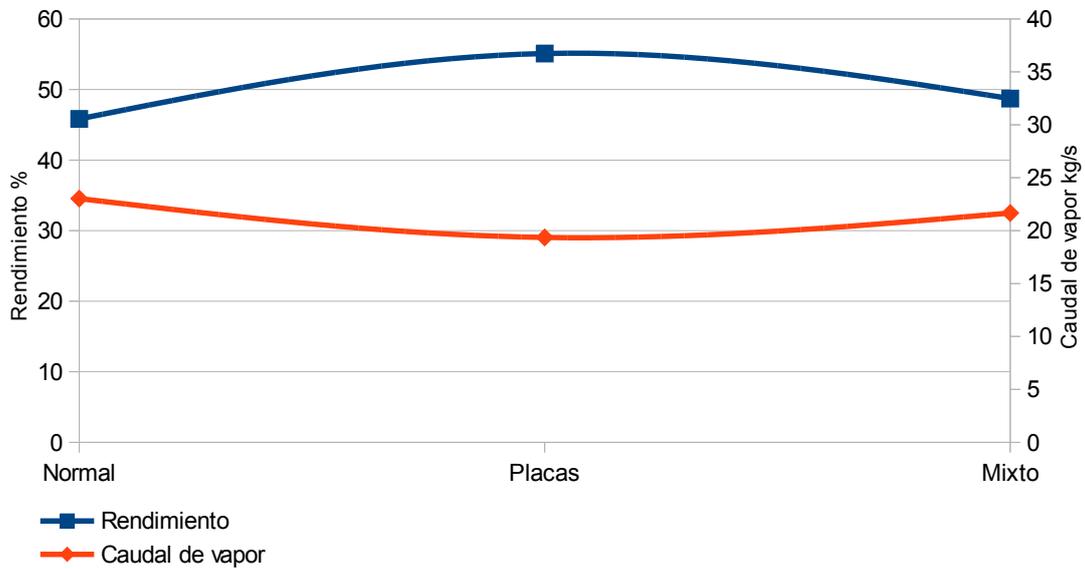
7.1. Gráficas



En esta gráfica se puede observar como el menor caudal de vapor generado es en el caso de la instalación solo de placas, seguida por el mixto. Esto es debido a la disminución en las extracciones, es decir, en los casos en los que no se use el vapor para precalentar el agua de alimentación, la producción de vapor será menor ya que no se necesita un aporte extra para esta función, iría todo directamente a la turbina para generar trabajo.

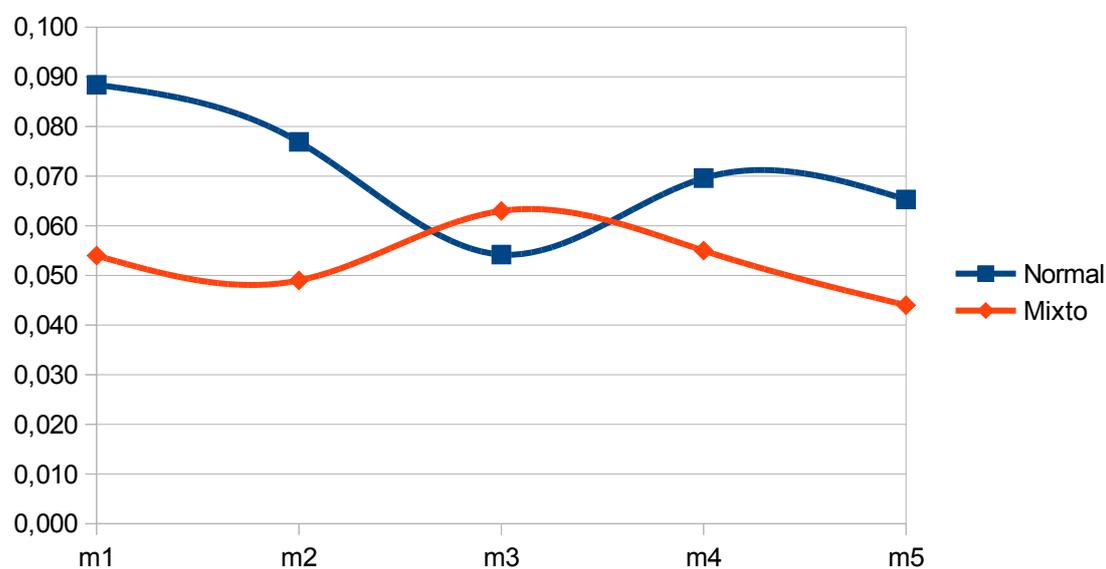


En esta otra vemos como están relacionado el trabajo de la turbina con el rendimiento. Observando que cuando mayor sea el rendimiento mayor será el trabajo de la turbina. Esto queda representado en la fórmula del cálculo del rendimiento, en la que se relaciona el trabajo de la turbina en el numerador, y el calor absorbido en el denominador. Puesto que el calor absorbido es constante, está claro que un aumento del trabajo de la turbina supondrá un aumento del rendimiento térmico.



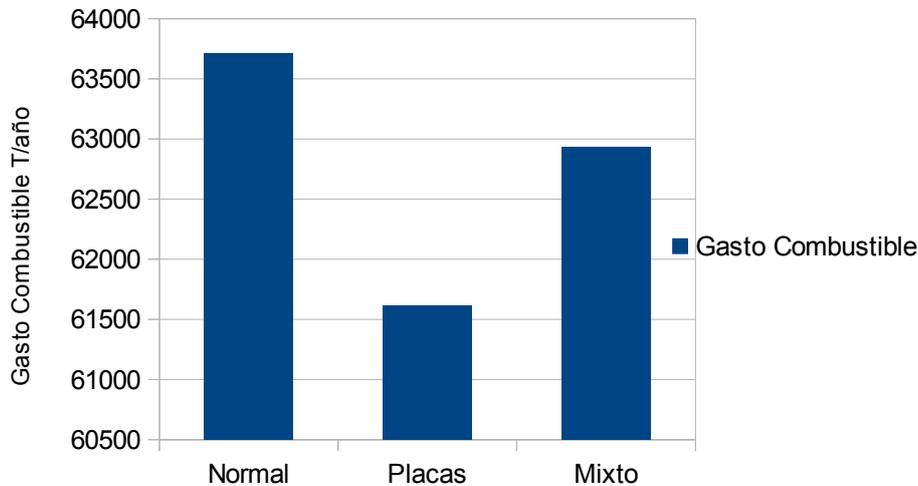
En las dos gráficas anteriores queda definido que cuando se consigue un trabajo elevado de la turbina y en consecuencia un mayor rendimiento, el caudal de vapor generado para ello disminuye. Que el caudal utilizado sea menor es debido a que el caudal de vapor se obtiene al dividir la potencia que se quiere obtener, en nuestro caso 25000 kW, entre el trabajo de la turbina, por lo tanto, cuanto mayor sea el trabajo de la turbina menor será el caudal de vapor, y como ya se había dicho anteriormente, el aumento del trabajo de la

turbina suponía un aumento del rendimiento, como ya se explicó en la segunda gráfica.



Aquí se puede observar como en casi todas las extracciones, la cantidad que se extrae es menor en la instalación mixta. La de solo placas no se incluyó ya que solo tendría un intercambiado de superficie.

Esto es debido a que no se requiere tanto vapor para elevar la temperatura del agua de alimentación, sino que parte se hace con las placas solares reduciendo de esta forma el caudal de las extracciones.



En esta gráfica se puede observar cual es el que más combustible gasta y la proporción que seguiría, es decir, si en el caso del mixto se fuera aumentando el aporte que generan las placas el consumo de combustible se reduciría. Y esto está relacionado con el caudal de vapor a generar, cuanto menor sea este, menor será la cantidad de combustible que se requiere para generar vapor

8.CONCLUSIONES

- La distribución de los equipos dentro de la configuración de la instalación de vapor es un factor importante en la elaboración de los cálculos y a la hora de mejorar el rendimiento.
- Comparando la instalación de vapor sin/con placas solares. La instalación con placas solares tiene unas fracciones másicas inferiores, lo que se traduce en una disminución del vapor que se extrae y en consecuencia en un aumento de la potencia de la turbina, siempre y cuando el caudal de vapor se mantenga constante, ya que si quisiera obtener la misma potencia, cuando se usan solo intercambiadores el caudal que se tiene que producir es mayor que en el caso de la instalación mixta.

- Un aumento del rendimiento térmico influye directamente en el gasto de combustible, y en consecuencia en una reducción de CO₂ del buque.
- La instalación de vapor con placas solares resulta la opción más competitiva debido a que supone el mayor ahorro de combustible. Esto es debido a que se aprovecha todo el vapor generado y no hay extracciones.
- El aumento de las fracciones másicas en las extracciones empeora el rendimiento y el ahorro energético.
- Debido a la potencia calorífica de los intercambiadores, se llegó a la conclusión que solo usar placas solares no era del todo adecuado, y se decidió estudiar otra disposición, en este caso la mixta. No obstante, se llegó a la conclusión de que el planteamiento era correcto y se podría aplicar
- La progresión en la disminución del gasto de combustible que se observa al introducir placas solares en los cálculos es adecuada siempre y cuando el sistema de vapor sea más pequeño (conste de una caldera para sistemas de calentamiento de agua, aceite, combustible, etc y no para propulsar un buque), o se dispusiera de más superficie para la instalación de las placas solares.

9. BIBLIOGRAFÍA

1. Bracco, S.; Damiani, L., “A non-conventional interpretation of thermal regeneration in steam cycles”. *APPLIED ENERGY*, 97(SI), 2012: 548–557, ISSN 0306-2619, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.12.047. 3rd International Conference on Applied Energy (ICAE), Perugia, ITALY, MAY 16-18, 2011.
2. AAS, T., *Engine Room Simulator. ERS Steam Plant SP25. User's Manual*. KongsbergMaritime, AS, 2007.
3. Diez, P. F., *Termodinámica técnica*. Universidad de Cantabria, 1996, ISBN 8489586128.
4. Martelli, E.; Amaldi, E.; Consonni, S., “Numerical optimization of heat recovery steam cycles: Mathematical model, two-stage algorithm and applications”. *Computers and Chemical Engineering*, 35(12), 2011: 2799 – 2823, ISSN 0098-1354, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2011.04.015>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098135411001591>.
5. Zebian, H.; Mitsos, A., “A double-pinch criterion for regenerative Rankine cycles”. *Energy*, 40(1), 2012: 258 – 270, ISSN 0360-5442, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2012.01.074>.
6. Kirillin, V.; et al., *Termodinámica técnica*. Mir, 1976.
7. Habib, M.; Said, S.; Al-Zaharna, I., “Thermodynamic optimization of reheat regenerative thermal-power plants”. *Applied Energy*, 63(1), 1999: 17 – 34, ISSN 0306-2619, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0306-2619\(99\)00017-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0306-2619(99)00017-3).

8. Haywood, R., *Analysis of Engineering Cycles: Power, Refrigerating and Gas Liquefaction Plant*. Thermodynamics and Fluid Mechanics for Mechanical Engineers, Elsevier Science, 1991, ISBN 9780080984131.
9. Con la url:<https://www.idenergia.com/blog/funcionamiento-de-las-placas-solares-termicas/>
10. Con la url: <http://www.abc-panelessolares.com/2011/04/panel-solar-termico-dimensiones-y.html>
11. Con la url: http://suelosolar.com/guiasolares/acs/rendimiento_colectores.asp
12. Con la url:<https://solar-energia.net/energia-solar-termica/captadores-solares-termicos>
13. Con la url: <http://instalacionesyeficienciaenergetica.com/paneles-solares-termicos-cual-elegimos/>

10. Anexos

PUESTA EN MARCHA DEL SP25

Este simulador dispone de una planta de propulsión con turbina de vapor que suministra energía a un superpetrolero. Posee una caldera auxiliar y otra principal, aunque en condiciones normales solo se trabaja con la caldera principal dejando la caldera auxiliar para casos de emergencia.

A continuación, se indicarán los pasos necesarios para poder poner en marcha el simulador [2].

1. Lo primero que se hará es preparar el diésel para poder activar todo lo necesario para poner en funcionamiento las calderas. La planta eléctrica está compuesta por dos diésel y un turbogenerador
2. Se pondrá en funcionamiento la caldera auxiliar, el vapor que se genera en esta, será utilizada en el generador de baja, utilizando el vapor de este para posteriormente calentar el fuel y comenzar con la puesta en marcha de la principal
3. Se actuará en el controlador de nivel de ambas calderas, para mantener la cantidad de agua en esta.
4. El procedimiento de puesta en marcha de ambas calderas siguen el mismo proceso. Además de las bombas y controlador para el nivel de agua, se activará el aire y la entrada del combustible en los encendedores, con esto se encenderá la caldera y se esperará a que alcance la presión de trabajo.
5. Se dará carga al turbo generador y se va aumentando las revoluciones del buque consiguiendo de esta forma ponerlo a su máxima potencia.



Escuela Técnica Superior de Náutica



Anexo V: AVISO DE RESPONSABILIDAD

AVISO DE RESPONSABILIDAD:

Este documento es el resultado del Trabajo Fin de Máster de un alumno, siendo su autor responsable de su contenido.

Se trata por tanto de un trabajo académico que puede contener errores detectados por el tribunal y que pueden no haber sido corregidos por el autor en la presente edición.

Debido a dicha orientación académica no debe hacerse un uso profesional de su contenido.

Este tipo de trabajos, junto con su defensa, pueden haber obtenido una nota que oscila entre 5 y 10 puntos, por lo que la calidad y el número de errores que puedan contener difieren en gran medida entre unos trabajos y otros,

La Universidad de Cantabria, la Escuela Técnica Superior de Náutica, los miembros del Tribunal de Trabajos Fin de Máster así como el profesor/a director no son responsables del contenido último de este Trabajo.

