



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

SIMULACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA CON ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA THERMAL POWER PLANT SIMULATION WITH ENERGY STORAGE

Autor

Ignacio Nieto Usón

Director

Luis M Romeo

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2017



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. _____,

con nº de DNI _____ en aplicación de lo dispuesto en el art. 14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster) _____, (Título del Trabajo)

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza,

Fdo: _____

SIMULACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA CON ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

RESUMEN

En este trabajo estudio si una central térmica con almacenamiento de energía es capaz de satisfacer la demanda variable que existe, gracias a la circulación de lechos fluidos. Además, analizaré la viabilidad económica de este tipo de plantas, que tratan de aprovecharse de la variabilidad de la demanda eléctrica, al igual que del precio de la electricidad, para obtener los mayores ingresos posibles.

Esta central va a trabajar a carga constante en el tiempo, siendo la potencia de esta a veces superior a la demanda eléctrica, y en otros casos inferior. En el primer caso, no necesitamos usar toda la potencia de nuestra planta para cubrir la demanda, por tanto, podemos usar parte de esta energía para calentar los lechos, los cuales una vez calientes, se podrán almacenar en silos. En periodos de alta demanda, con la potencia de combustión de nuestra planta, no somos capaces de satisfacer esa demanda, y vamos a necesitar un aporte extra de energía para cubrirla. En este momento es cuando usamos los lechos calientes previamente almacenados, para usarlos como fuente de calor, y generar más electricidad.

Este trabajo no incluye los cálculos de combustión, ni los correspondientes al diseño de los silos. Dos variables que deben analizarse con más detalles y que se desarrollaran en trabajos posteriores.

ÍNDICE

1	Introducción	3
1.1	Objetivos	3
1.2	Problemática	4
2	Simulación de una central térmica con lecho fluido circulante.	5
2.1	Funcionamiento de un ciclo de vapor.	7
2.2	Desarrollo del modelo del ciclo de vapor con EES.....	9
3	Almacenamiento de energía en una central térmica con lecho fluido circulante. 18	18
3.1	Simulación de una central térmica con almacenamiento de energía.	22
3.2	Simulación de una central térmica con recuperación de energía.	22
4	Flexibilidad de una central térmica.	23
4.1	Demanda eléctrica.....	23
4.1.1	Primavera.....	23
4.1.2	Verano	27
4.1.3	Otoño.....	30
4.1.4	Invierno.....	33
4.2	Rentabilidad Económica.	35
4.2.1	Central térmica sin almacenamiento de energía.	35
4.2.2	Central térmica con almacenamiento de energía.	41
5	Conclusiones.....	45
6	Anexos	46
6.1	Anexo 1. Ajuste demandas.	46
6.2	Anexo 2. Ingresos por cuatrimestre.....	50
7	Bibliografía.....	59

1 *Introducción*

El presente trabajo trata de demostrar la competitividad de las centrales térmicas con almacenamiento de energía, frente a otro tipo de sistemas de producción de energía.

Conforme avanza el tiempo, la preocupación por nuestro planeta y el cambio climático aumenta. Esto no pasa desapercibido en la producción de energía. Actualmente se intenta apostar por las energías renovables, ya que son las más limpias, y menos contaminantes. La búsqueda de sistemas de generación de energía más limpia y produciendo la menor cantidad de CO_2 sigue siendo uno de los principales temas de investigación.

Haremos una primera explicación del ciclo de vapor utilizado, además de la caldera de una central térmica convencional, y de cómo lo hemos modelizado para hacer la simulación. Posteriormente, explicaremos el funcionamiento de nuestra planta con almacenamiento de energía, y de cómo hemos adaptado el programa para modelizarlo. A continuación, incluiremos la variable tiempo, y comprobaremos que nuestra central con almacenamiento de energía es capaz de adaptarse a la demanda, y cubrirla en su totalidad. Finalmente, analizaremos si es económicamente rentable, en comparación con una central térmica convencional.

1.1 **Objetivos**

Los objetivos de este trabajo son:

- Explicar el funcionamiento de una central térmica con almacenamiento de energía mediante el uso de lechos circulantes.
- Hacer una simulación en el programa informático “Engineering Equation Solvent” (EES), de una central térmica convencional. Haciendo especial hincapié en el ciclo de vapor utilizado.
- Adaptación del EES a una central térmica con almacenamiento de energía.
- Comprobar si nuestra planta con almacenamiento de energía es eficiente y rentable en el tiempo.
- Comparar los resultados económicos de una central térmica convencional, con una central térmica con almacenamiento de energía.

1.2 Problemática

Actualmente, tenemos diversas formas de generar electricidad, la mayoría de ellas transformando energía térmica en energía eléctrica a través de un generador. Las principales maneras de generar electricidad son a partir de centrales térmicas de combustibles fósiles (sólido, líquido o gas), centrales nucleares y energías renovables (eólica, solar FV y térmica, hidráulica).

Cómo ya se dijo anteriormente, la preocupación por el medio ambiente y el cambio climático influye en la búsqueda de energías más limpias. Cabe pensar que las mejores en este sentido son las energías renovables. Sin embargo, este tipo de energías tienen un problema fundamental, que es que dependen de las condiciones climatológicas para producir la energía. Es decir, una central eólica necesita viento para generar energía, y este es un recurso que no se puede controlar. A pesar de estos inconvenientes, si estas plantas se colocan en lugares donde este recurso es muy abundante (cierzo en el valle del Ebro, por ejemplo), pueden tener éxito. Pero hay otro problema importante en este tipo de plantas, que es el coste de las instalaciones, además de su mantenimiento.

Sin embargo, el mayor inconveniente de cualquier forma de generar energía es la imposibilidad de almacenar dicha energía. La energía sólo se puede transformar, pero no almacenar. Ante una demanda variable, es necesario ajustar la producción de energía a la demanda. El procedimiento que se sigue hasta ahora es adaptar la producción de la energía a la demanda existente. Ante una demanda variable, y con la imposibilidad de almacenar energía, en nuestro país Red Eléctrica Española (REE) da órdenes a las distintas centrales sobre qué producción de energía tienen que hacer a lo largo del día, especificando incluso las horas de producción.

Otro tema importante, es el económico. El precio de la electricidad es, al igual que la demanda, muy variable, siendo muy barata en momentos de baja demanda, y más cara en los momentos de mayor demanda. Nuestra planta intenta aprovechar la fluctuación de demanda y precios para maximizar el beneficio económico, ya que la idea es almacenar en momentos de baja demanda, que es cuando el precio de la electricidad es menor, y vender esta energía en momentos de alta demanda, que es cuando mayor es el precio de la electricidad.

Ante esta producción variable de energía, hay ciertas plantas que presentan problemas técnicos. Por ejemplo, las centrales térmicas de carbón producen energía en función de lo que REE les ordena. Estas plantas pueden trabajar a carga total, es decir a potencia máxima, o a carga parcial, es decir por debajo de su potencia nominal. Sin embargo, nunca van a poder trabajar por encima de su potencia nominal, lo cual hace que sea imposible adaptar la producción de energía de una central térmica a la demanda de una zona en concreto. Esto no es posible porque la demanda presenta picos, que requieren más potencia que la nominal de la planta.

Las centrales térmicas con almacenamiento de energía en silos pueden resolver parte de este problema. El almacenamiento de energía pasa de ser una utopía a una realidad, gracias a unos silos que almacenan sólidos calientes que se usan para generar electricidad en momentos de mayor demanda. Además, el problema de la flexibilidad en centrales térmicas podría quedar solucionado, ya que nuestra central va a ser capaz de adaptar la potencia a la demanda que hay en cada instante. Sin embargo, estas plantas van a tener el mismo problema en cuanto a contaminación, ya que se va a seguir realizando la combustión en la caldera.

2 Simulación de una central térmica con lecho fluido circulante.

De acuerdo a [1], en los últimos años se han hecho investigaciones para encontrar sistemas con almacenamiento de energía. Esto nos permitirá variar la potencia de salida, sin necesidad de cambiar el proceso de combustión. Esta idea de usar almacenamiento de energía no es nueva y se han propuesto numerosos diseños [3]. Uno de estos diseños consistía en una planta de combustión de carbón, que calentaba sal fundida, y la almacenaba en tanques de alta temperatura durante períodos de baja demanda eléctrica. Durante períodos de alta demanda, la sal caliente es retirada de estos tanques y usada como fuente de calor en un ciclo de vapor. Después, la sal fundida fría es llevada a un tanque de baja temperatura [4]. Este sistema está disponible actualmente, y es empleado en plantas solares [5]. Otro sistema de almacenamiento de energía para plantas solares es usar sólidos móviles para almacenar energía como calor latente [6-8]. Estos sistemas están formados por dos silos para almacenar energía a diferente temperatura y, como mínimo, un intercambiador de calor para transferir la energía del sol a los sólidos durante períodos de carga, y otro intercambiador para transferir la energía almacenada en los sólidos a un fluido durante períodos de descarga.

Otro ejemplo de almacenamiento de energía en plantas con combustibles fósiles es usar tanques de agua caliente integrados en el ciclo de vapor [4]. Durante períodos de alta demanda, el agua caliente puede ser descargada en el ciclo para evitar consumo de vapor en los precalentadores de agua. Esto puede aumentar la potencia disponible. Sin embargo, estas soluciones producen pequeños aumentos en la cantidad de energía disponible y no pueden ser considerados efectivos para sistemas de almacenamiento de energía a larga escala. Nosotros nos vamos a centrar en una central térmica con almacenamiento de energía con lecho fluido circulante, que usa la capacidad energética de la cámara de combustión para calentar los lechos, y usarlos posteriormente para generar más energía.

La central térmica con almacenamiento de energía constará de una cámara de combustión, donde se producirá la combustión a partir de aire y fuel. En dicha cámara, añadiremos un lecho fluido circulante, que se calentará y almacenará en silos para su posterior aprovechamiento. La forma de operar de esta central será la siguiente: en la cámara de combustión se podrá generar una potencia determinada máxima,

dependiendo del carbón, y el aire introducido. Con el calor generado en la caldera, a través de un intercambiador de calor, y un ciclo de vapor, conseguimos parte de la potencia de nuestra planta. A la salida de la caldera, los sólidos calientes son llevados a un ciclón, donde en función de si estamos en un momento de alta o baja demanda, se distribuyen de forma diferente. En periodos de baja demanda, todos los sólidos son llevados a un silo de alta temperatura, donde se acumulan. Por tanto, no se generará más energía que la producida en la caldera.

En periodos de alta demanda, parte de estos sólidos son llevados a un primer intercambiador, donde se usan para obtener más energía a través de otro ciclo de vapor. Una vez usado el calor de los sólidos, éstos son trasladados a un silo de baja temperatura, donde se almacenan, y se utilizaran posteriormente para alimentar la caldera en momentos de baja demanda.

Otra parte de estos sólidos calientes se utiliza para realimentar la caldera, y otra es llevada al tercer intercambiador, el cual es alimentado por los sólidos del silo de alta temperatura en épocas de alta demanda. Este proceso permite incrementar notablemente la potencia que es capaz de generar nuestra central. Todo el proceso descrito anteriormente, se puede ver en la Fig. 1.

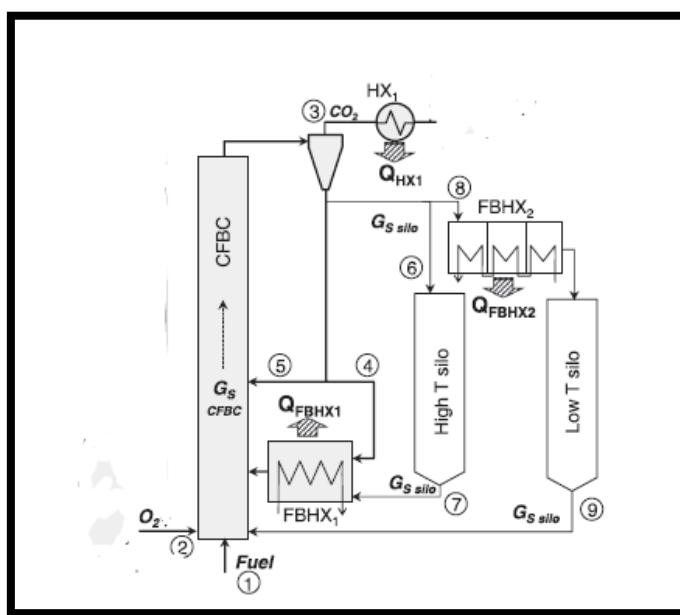


Fig. 1. Esquema básico funcionamiento planta con almacenamiento de energía en silos.

A la hora de calcular este tipo de centrales, hay que considerar parámetros como la ratio de potencia, que es la relación entre la potencia generada en la combustión y la potencia máxima que puede dar la planta, y el tiempo que cuestan llenarse y vaciarse los silos de alta y baja temperatura. Sin embargo, el análisis de estos parámetros que están relacionados con la optimización de la combustión y el diseño de los silos lo dejamos para trabajos posteriores.

2.1 Funcionamiento de un ciclo de vapor.

Para poder hacer la simulación de nuestra central térmica con almacenamiento de energía, hemos realizado primero la simulación de una central térmica convencional, ya que el proceso de combustión y ciclo de vapor van a ser similares. El ciclo de vapor que hemos utilizado en nuestra central térmica se muestra en la Fig. 2.

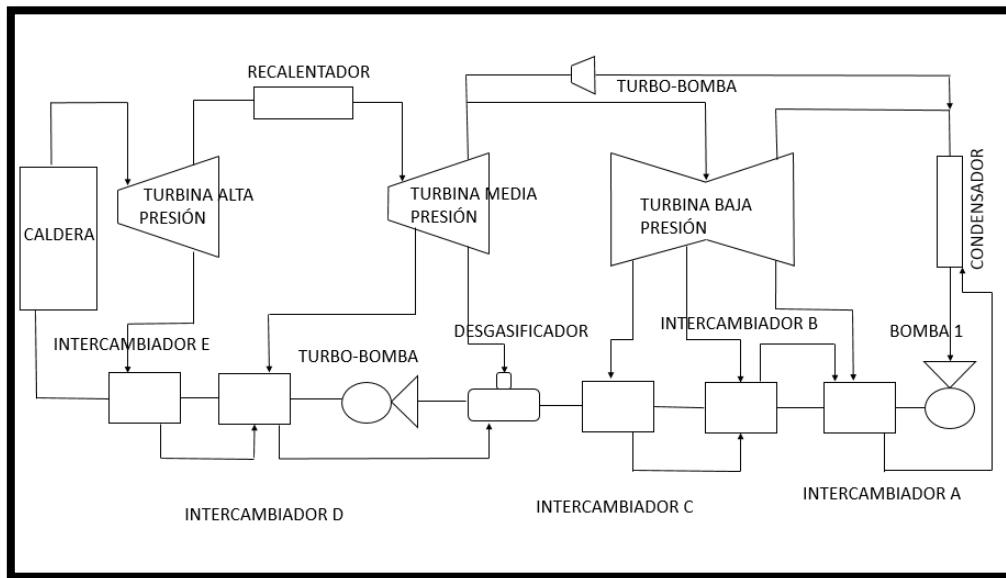


Fig.2. Ciclo de vapor Central Térmica.

Este ciclo de vapor básico está formado entre otras cosas, por una caldera, en la que se produce la combustión, produciendo el calor que se aprovechará posteriormente en el ciclo. El calor que aporta el fuel lo he obtenido del estudio de B. Arias [2], que nos da datos en plantas similares a esta.

En una central térmica se aprovecha el calor generado en una caldera para, a través de un ciclo de vapor, mover unas turbinas las cuales transforman la energía térmica en mecánica. Esta energía mecánica es transformada posteriormente en energía eléctrica en los alternadores.

La condición principal de cualquier ciclo de vapor óptimo es que exista una gran diferencia de temperaturas a la entrada y salida de las turbinas, para transformar el mayor calor posible. Además, se intenta que la temperatura a la cual el vapor vuelve a la caldera no sea muy baja, ya que cuanto más baja sea, más calor habrá que aportar en la caldera, y por tanto más fuel y dinero habrá que gastar. Esta es la función básica de los intercambiadores en el ciclo de vapor: aumentar la temperatura del vapor de agua, gracias a un intercambio de calor con otro líquido. Nuestro ciclo de vapor es el representado en la Fig. 2: con tres turbinas, operando a tres niveles diferentes de presión.

La caldera está formada por un evaporador, un economizador, dos sobrecalentadores, y un recalentador, que son los que transmiten este calor al ciclo de vapor.

- El evaporador es una máquina que se utiliza en la caldera para conseguir que el agua pase de estado líquido a vapor. Esto se hace porque la energía que puede aportar un líquido en estado de vapor es mayor que en estado líquido.
- En el economizador, lo que se busca es aumentar la temperatura del agua, hasta alcanzar la temperatura de saturación de ésta. Para posteriormente, en el evaporador, conseguir el cambio de fase.
- En los sobrecalentadores, se incrementa la temperatura del vapor de agua ya que, a mayor temperatura, mayor energía somos capaces de obtener.
- El recalentador, como su nombre indica, tiene la función de recalentar el vapor de agua en un momento concreto del ciclo de vapor. Esto se consigue, haciendo pasar dicho vapor por la caldera.

Pasaré ahora a explicar en detalle el funcionamiento de nuestro ciclo de vapor mostrado en la Fig. 2.

A la salida de la caldera, tenemos una turbina de alta presión, a la cual llega el vapor con la mayor presión posible, y sale a una presión menor. Parte de este vapor es llevado a un intercambiador (intercambiador E), y otro es llevado a un recalentador, lugar donde se aumentará la temperatura del vapor. Posteriormente, el vapor de agua pasa a una segunda turbina de presión intermedia. En esta segunda turbina, se vuelve a disminuir la presión, llevando parte del vapor de agua a otro intercambiador (intercambiador D), y otra parte a un desgasificador, que es un aparato en el cual se disuelve el oxígeno, para intentar que no se formen ácidos que puedan deteriorar el ciclo. Otra parte se lleva a una turbo-bomba, que no es más que una turbina cuya característica principal es que tiene el mismo flujo másico, cuando funciona como turbina y cuando funciona como bomba. Sin embargo, la mayor parte de este flujo másico de la turbina intermedia pasa a una última turbina de baja presión. En esta última turbina, parte del flujo másico total se va a tres intercambiadores diferentes (intercambiador A, intercambiador B e intercambiador D), y el resto del flujo másico sigue el ciclo de vapor normal, derivándose al condensador.

Una vez en el condensador, el vapor de agua pasa de estado vapor a estado líquido. Posteriormente, y gracias a una bomba, este líquido es introducido al primer intercambiador (intercambiador A).

En este primer intercambiador, el agua líquida aumenta su temperatura gracias a una disminución de la temperatura del vapor de agua procedente de la turbina de baja presión. A continuación, el agua pasa a un segundo intercambiador (intercambiador B), en el cual se vuelve a aumentar la temperatura, a costa de disminuir la temperatura del agua que viene del intercambiador de baja presión. Posteriormente el agua pasa a un tercer intercambiador (intercambiador C). A la salida de este intercambiador, el agua se dirige hacia el desgasificador, cuya función ya hemos explicado anteriormente. El agua pasa posteriormente a la turbo-bomba, en este caso funcionando como bomba, que incrementa su presión. De la bomba pasamos a otro intercambiador (intercambiador D), en el cual volvemos a aumentar la temperatura del agua, a costa de una disminución en

el agua que proviene de la turbina de presión intermedia. Por último, el agua pasa a un último intercambiador (intercambiador E) en el cual se vuelve a aumentar la temperatura, a costa de una disminución de la temperatura del agua que proviene de la turbina a alta presión. Llegando finalmente a la caldera, donde habrá que aumentar la temperatura del agua hasta la temperatura del punto 1.

2.2 Desarrollo del modelo del ciclo de vapor con EES.

Una vez he explicado el funcionamiento general de nuestro ciclo de vapor, paso a explicar cómo he desarrollado el modelo de este ciclo con EES. Para realizar esta simulación, nos hemos basado en [1-2], los cuales nos dan información sobre los valores de presión y temperatura típicos que hay en un ciclo de vapor de una central térmica convencional. A pesar de que en [1-2] hablan de oxicombustión, he realizado el modelo para una combustión normal con aire. Mi objetivo será obtener todos los flujos másicos de nuestro ciclo, en especial el flujo másico uno, que es el que sale por la caldera, y que nos permitirá conocer el resto.

Para resolver las turbinas, hemos realizado el siguiente procedimiento. A partir de las presiones y temperaturas, somos capaces de calcular la entalpía de cada punto. Conociendo el rendimiento isoentrópico de las turbinas, somos capaces de calcular la entalpía del punto de salida, y con este dato y la presión o temperatura que serán conocidas, somos capaces de obtener todas las propiedades termodinámicas en ese punto. Como en las turbinas, hay más de un flujo másico, para poder resolverlo, hemos dividido las turbinas de la siguiente manera, como se puede ver en la Fig. 3.

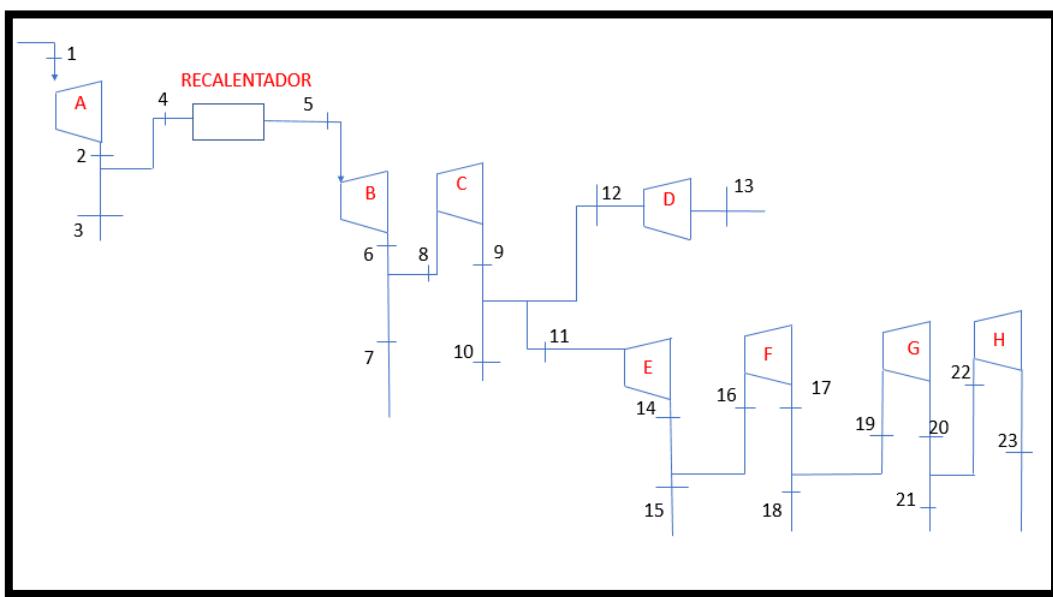


Fig. 3. División turbinas para modelado en EES.

En esta figura, podemos ver la numeración que se ha seguido para la resolución en EES. La turbina de media presión se ha dividido en dos, turbina B y C. Mientras que la turbina de alta presión se divide en cuatro turbinas (turbina E, turbina F, turbina G, y turbina H). A continuación, vamos a explicar cuál ha sido la metodología llevada a cabo para resolver

las turbinas en el programa. Explicaré cómo he resuelto la turbina A, siguiendo el mismo procedimiento para resolver las demás turbinas.

De la turbina A, conocemos la presión y temperatura del punto uno [2]. A partir de estos datos, podemos obtener la entalpía en este punto. Como conocemos los rendimientos isoentrópicos de todas las turbinas, aplicando la definición de éste, podemos obtener la entalpía del punto de salida, en este caso del punto 2.

$$\eta_{\text{isoentrópico}} = \frac{h_{\text{entrada}} - h_{\text{salida}}}{h_{\text{entrada}} - h_{\text{salida isoentrópica}}} \quad (1)$$

La entalpía de salida isoentrópica se obtiene a partir de la presión del punto dos que es conocida, y de la entropía del punto uno. El mismo procedimiento se ha seguido para resolver las demás turbinas. Los rendimientos isoentrópicos que se han usado se muestran en la Tabla 1.

η_A	η_B	η_C	η_D	η_E	η_F	η_G	η_H
0,85	0,85	0,90	0,90	0,85	0,90	0,90	0,90

Tabla 1. Rendimientos isoentrópicos de las turbinas.

Una vez obtenidos todos los valores de presión, temperatura, y entalpía de los puntos de la gráfica dos, explico cuál ha sido la metodología para resolver el resto de puntos. En la Fig. 4., podemos ver el esquema y numeración que hemos seguido para su resolución en EES.

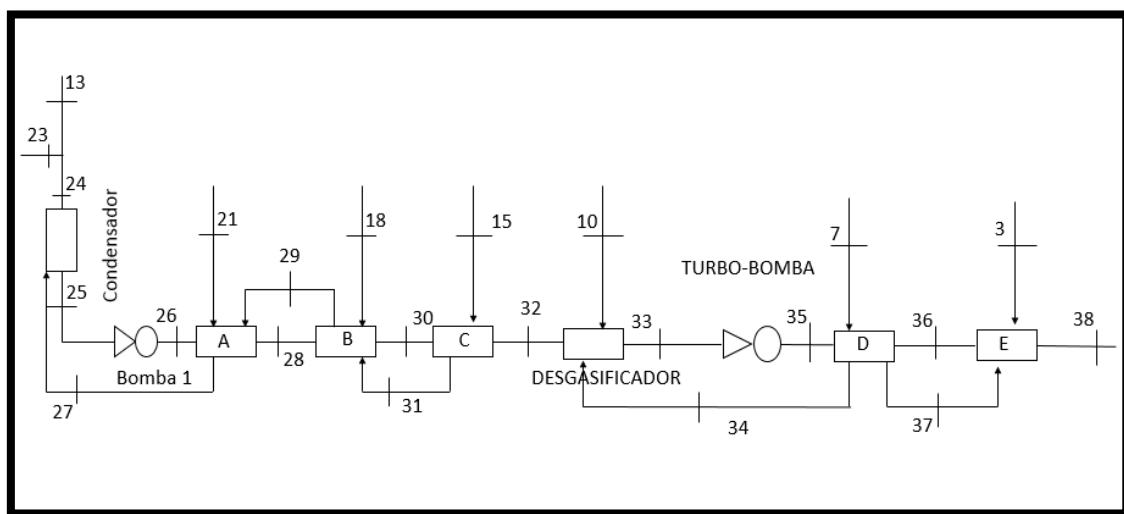


Fig. 4. Numeración de los puntos para la resolución en EES.

En el caso del condensador, la característica principal es que el agua en estado de vapor pasa a estar en estado líquido. Sin embargo, la presión y temperatura sigue siendo la misma que en el punto anterior. Por tanto, lo que va a cambiar va a ser el “título”, que pasará a ser cero.

Para resolver la bomba, hemos seguido el mismo procedimiento que hemos hecho en las turbinas. Conocida la presión y temperatura del punto de entrada a la bomba y la

presión de salida, a partir de la definición de rendimiento isoentrópico de la bomba, somos capaces de sacar la entalpía del punto de salida, y por consiguiente la temperatura del punto de salida,

$$\eta_{\text{isoentrópico}} = \frac{h_{\text{salida isoentrópica}} - h_{\text{entrada}}}{h_{\text{salida}} - h_{\text{entrada}}} \quad (2)$$

siendo la entalpía de salida isoentrópica, aquella con la presión del punto de salida y misma entropía que en el punto de entrada.

El rendimiento isoentrópico usado en estas bombas se muestra en la Tabla 2.

η_1	$\eta_{\text{Turbo-bomba}}$
0,90	0,80

Tabla 2. Rendimiento isoentrópico bombas.

En los intercambiadores de calor, como bien dice su nombre, se produce un intercambio de calor entre dos fluidos. Uno de estos fluidos (vapor de agua), viene de las turbinas a alta temperatura, y tras el intercambio de calor con otro fluido (agua líquida), sale a menor temperatura que con la que entró, saliendo el agua líquida a mayor temperatura. Esto tiene sentido, ya que nuestro objetivo es que el agua líquida llegue a la caldera a la mayor temperatura posible, para tener que gastar menos en calentarla. La metodología que hemos llevado a cabo, para resolver estos intercambiadores en EES, ha sido la siguiente: como saber qué cantidad de agua está en estado líquido y cuál está en estado vapor en un intercambiador es imposible, adoptaremos la metodología que siguen los fabricantes para diseñar los intercambiadores. Supondremos que sabemos las diferencias de temperatura entre el foco frío y el foco caliente, que es aproximadamente constante para todos los intercambiadores. A estos valores de temperatura, se les llama *Terminal Temperature Difference* (TTD), y *Drain Cooling Approach Temperature* (TDCA).

El TTD es la diferencia de temperaturas entre la temperatura de entrada del foco caliente, y la temperatura de salida del foco frío, siendo el TDCA la diferencia de temperaturas entre la temperatura de salida del flujo caliente, y la temperatura de entrada del flujo frío.

Los valores que se toman habitualmente para estos dos parámetros se muestran en la Tabla 3.

TTD	TDCA
3 °C	5 °C

Tabla 3. Diferencia de temperaturas en los intercambiadores.

A partir de esta aproximación, y con los correspondientes balances de energía y materia, estamos en disposición de obtener todas las incógnitas que estamos buscando. En los intercambiadores, al igual que en las turbinas y bombas, lo que realmente nos interesa obtener son los flujos másicos.

Explicaré la resolución del intercambiador A, siendo la resolución de los restantes similar a este. En la Fig. 5, podemos observar las diferencias de temperaturas entre los focos calientes y fríos.

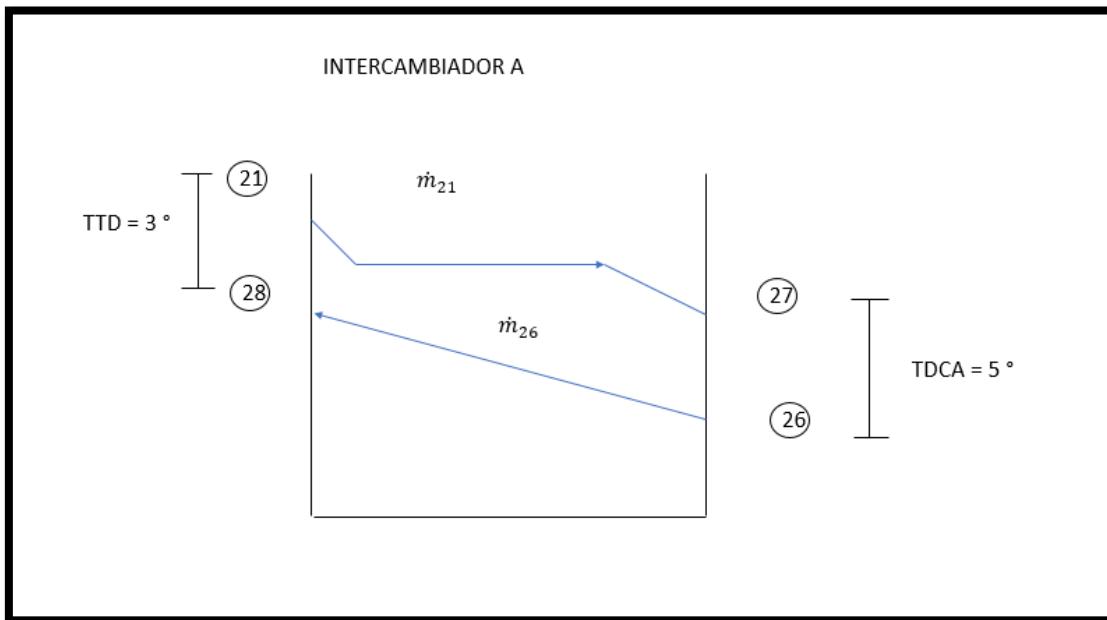


Fig. 5. Diferencia de temperaturas intercambiador A.

En la Fig. 5. podemos observar lo explicado anteriormente: el fluido procedente de la turbina, en este caso m_{21} se enfriá, cediendo calor al flujo que viene de la bomba, en este caso m_{26} , el cual se calienta. También se puede observar la diferencia de temperaturas entre las entradas y salidas de los focos calientes y fríos (TTD y TDCA). En este caso, tenemos como incógnitas la temperatura de salida del foco frío, y la temperatura de salida del foco caliente, siendo todas las presiones conocidas.

A partir de las expresiones usadas para diseñar los intercambiadores, somos capaces de averiguar estas temperaturas. A continuación, tenemos las expresiones utilizadas para obtener las incógnitas de temperatura del intercambiador A.

$$T_{27} = T_{26} + TDCA \quad (3)$$

$$T_{28} = T_{Sat\ 21} - TTD \quad (4)$$

Una vez obtenidas todas las presiones y temperaturas de nuestro intercambiador, será necesario calcular los distintos flujos máscicos. Para ello procedemos a hacer balances de materia y de energía.

En la Fig. 6. podemos ver los distintos flujos másicos que intervienen en el intercambiador A.

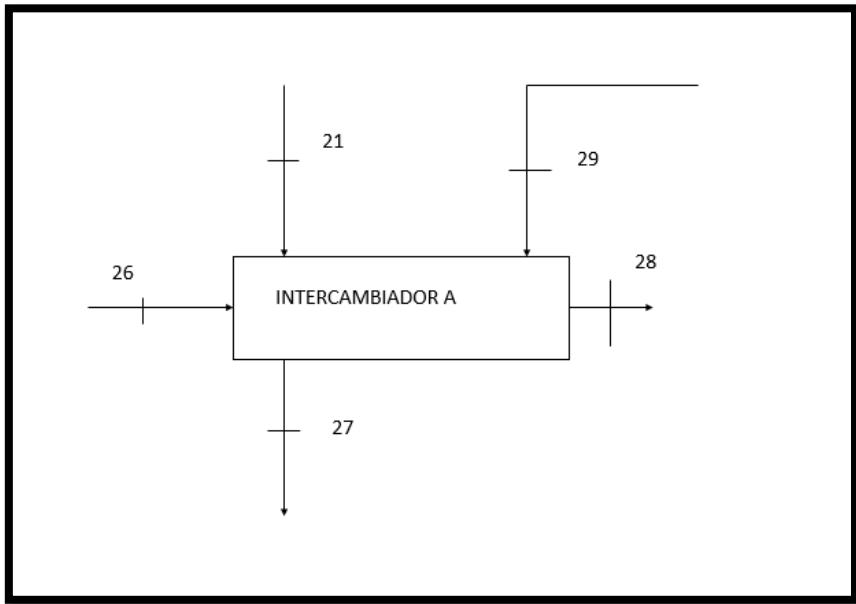


Fig. 6. Flujos másicos intercambiador A.

El flujo másico del foco frío va a ser el mismo a la entrada que a la salida, ya que no se le aporta nada más. Sin embargo, el flujo másico del foco caliente, que es el vapor de agua, va a tener dos entradas, que hacen que el flujo másico que sale sea igual a la suma de los de entrada. Usando las siguientes expresiones para el intercambiador A.

$$\dot{m}_{26} = \dot{m}_{28} \quad (5)$$

$$\dot{m}_{21} + \dot{m}_{29} = \dot{m}_{27} \quad (6)$$

$$\dot{m}_{21} * h_{21} + \dot{m}_{29} * h_{29} + \dot{m}_{26} * h_{26} = \dot{m}_{27} * h_{27} + \dot{m}_{28} * h_{28} \quad (7)$$

Este mismo procedimiento, se seguiría para calcular el resto de los intercambiadores. En cuanto al desgasificador, se resuelve como si fuera un intercambiador, pero teniendo en cuenta que a la salida de éste, el título será igual a cero.

Cabe destacar, que hasta que no se plantean todas las ecuaciones de los intercambiadores, no se puede resolver los flujos másicos de cada uno, ya que, en cada intercambiador, salvo en el último, tenemos tres ecuaciones y cuatro incógnitas.

En cuanto a la caldera, como se ha dicho anteriormente, está formada por el evaporador, el economizador y dos sobrecalentadores, aunque también se utiliza el calor de ésta para realizar un recalentamiento. Gracias a la caldera, vamos a ser capaces de obtener el flujo másico más importante, el \dot{m}_1 , y a partir de éste todos los demás. A partir de la Fig. 7. vamos a explicar cuál ha sido el procedimiento a seguir para resolver la caldera.

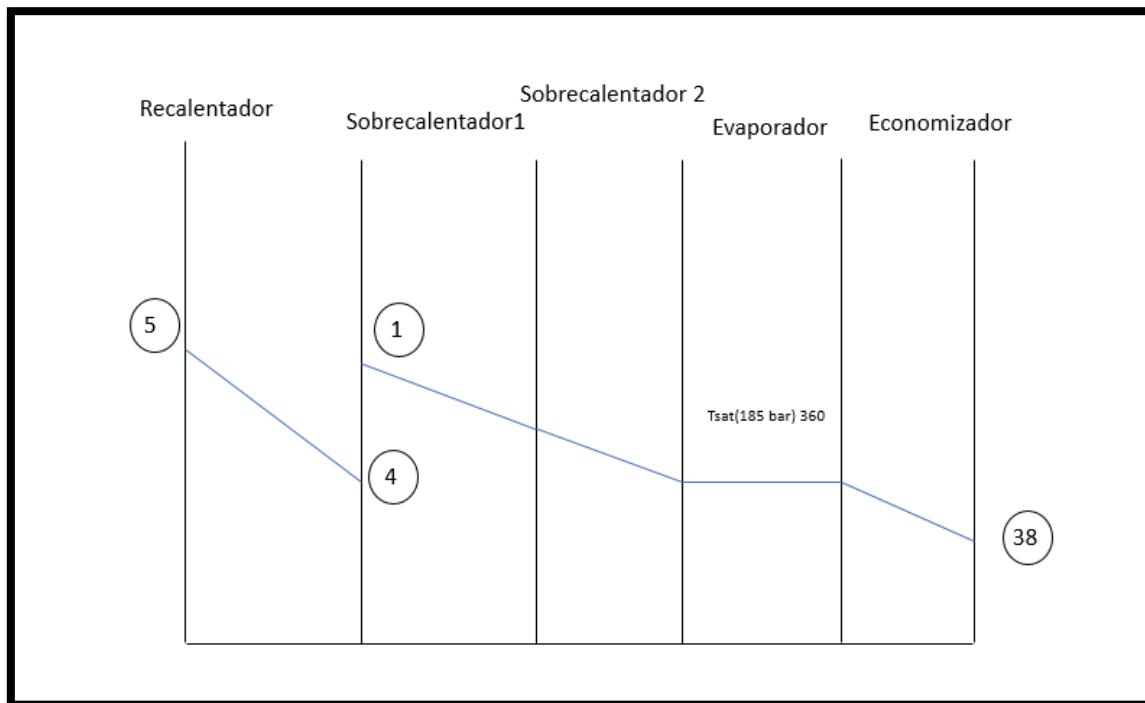


Fig. 7. Diferentes partes de una caldera.

Hemos supuesto que en el economizador conseguimos elevar el vapor a la mitad de la presión. Es decir, el vapor de agua entra al economizador a una temperatura $T = 251^\circ\text{C}$, y a una presión $P = 205 \text{ bar} = 20,5 \text{ MPa}$, y la temperatura a la que sale por la caldera es temperatura $T = 565^\circ\text{C}$, con una presión $P = 168 \text{ bar} = 16,8 \text{ MPa}$. Por consiguiente, en el economizador elevamos el vapor de agua a presión $P = 185 \text{ bar} = 18,5 \text{ MPa}$, y a una temperatura $T = 360^\circ\text{C}$, que es la temperatura de saturación a esa presión.

A continuación, en el evaporador conseguimos pasar toda el agua de estado líquido a estado vapor, para posteriormente calentarla en dos sobrecalentadores, los cuales calentarán cada uno lo mismo, y por tanto la mitad del calor necesario para llegar a la temperatura por la que sale el vapor en la caldera. Es decir, en los sobrecalentadores uno y dos, se aporta el calor necesario para calentar el agua desde $T = 360^\circ\text{C}$ hasta $T = 565^\circ\text{C}$.

Por último, en el recalentador, proceso en el cual también interviene la caldera, ésta cede el calor necesario para pasar de temperatura $T = 364^\circ\text{C}$, hasta $T = 565^\circ\text{C}$. Para obtener el flujo másico que sale por la caldera (\dot{m}_1), ha sido necesario calcular el calor que aporta cada uno de los aparatos que forman la caldera e igualarlo al calor que aporta esta en conjunto.

El calor que aporta cada uno de estos aparatos se calcula multiplicando el flujo másico que atraviesa a cada uno de éstos, por la diferencia de entalpía entre la salida y la entrada. A continuación, podemos ver las ecuaciones que hemos usado para obtener estos calores.

$$\dot{Q}_{recalentador} = \dot{m}_4 * (h_5 - h_4) \quad (8)$$

$$\dot{Q}_{Sobrecalentador1} = \dot{m}_1 * (h_1 - h_{Sat\ 185\ bar})/2 \quad (9)$$

$$\dot{Q}_{Sobrecalentador2} = \dot{m}_1 * (h_1 - h_{Sat\ 185\ bar})/2 \quad (10)$$

$$\dot{Q}_{Evaporador} = \dot{m}_1 * (h_{Sat\ x=1} - h_{Sat\ x=0}) \quad (11)$$

$$\dot{Q}_{Economizador} = \dot{m}_1 * (h_{Sat\ x=0} - h_{38}) \quad (12)$$

Como ya dijimos anteriormente, en este trabajo no nos hemos centrado en el proceso de combustión de la caldera, usando valores obtenidos de centrales térmicas con el mismo ciclo de vapor y misma estrategia. Por tanto, el dato del calor que aporta el fuel, lo hemos obtenido de [2], siendo este igual $\dot{Q}_{fuel} = 451\ MW$

El calor de la caldera lo hemos calculado, a partir del calor que es capaz de generar el fuel, y por tanto será un dato conocido.

$$\dot{Q}_{caldera} = 0,96 * Q_{fuel} \quad (13)$$

El calor que aporta la caldera es la suma del calor de los aparatos que la forman, y por tanto será igual a la expresión 14.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{caldera} = & \dot{Q}_{Recalentador} + \dot{Q}_{Sobrecalentador1} + \dot{Q}_{Sobrecalentador2} \\ & + \dot{Q}_{Evaporador} + \dot{Q}_{Economizador} \end{aligned} \quad (14)$$

La única incógnita que tenemos en esta ecuación es el flujo mísico 1, que por tanto podemos obtener a partir de la expresión 15.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{caldera} = & \dot{m}_4 (h_5 - h_4) + \dot{m}_1 \frac{h_1 - h_{Sat\ 185\ bar}}{2} + \dot{m}_1 \frac{h_1 - h_{Sat\ 185\ bar}}{2} + \\ & \dot{m}_1 (h_{Sat\ x=1} - h_{Sat\ x=0}) + \dot{m}_1 (h_{Sat\ x=0} - h_{38}) \end{aligned} \quad (15)$$

Una vez calculadas las temperaturas, presiones y entalpías de todos los puntos, ya estamos en disposición de calcular la potencia que generan las turbinas, además de la potencia necesaria en las bombas, y el calor intercambiado en los intercambiadores. Por tanto, podemos obtener la potencia total que es capaz de generar nuestra planta, en diferentes modos de carga.

La potencia de las turbinas se calcula multiplicando el flujo mísico que circula por ellas por la diferencia de entalpías entre la entrada y la salida, expr. 16.

$$\dot{W}_{turbina} = \dot{m}_e * (h_e - h_s) \quad (16)$$

Hemos realizado el mismo procedimiento con las bombas, en las cuales la potencia se calcula como el flujo mÁsico de entrada por la diferencia de entalpías entre la salida y la entrada, expr. 17.

$$\dot{W}_{bomba} = \dot{m}_e * (h_s - h_e) \quad (17)$$

En los intercambiadores se realiza, como bien dice su nombre, un intercambio de energía, de modo que hay un fluido que se calienta, y otro que se enfriA. Por tanto, el calor intercambiado se puede obtener calculando el calor que cede el flujo caliente, o el calor que absorbe el flujo frío, expr. 18.

$$\dot{Q}_{intercambiador} = \dot{m}_e * (h_s - h_e) \quad (18)$$

La potencia total serÁ el trabajo que es capaz de proporcionarnos las turbinas, menos el trabajo que es necesario aportar a las bombas, por el rendimiento de nuestra central. Sin embargo, en una central tÉrmica hay una serie de elementos auxiliares, los cuales necesitan de energÍa para funcionar, y habrá que tenerlos en cuenta. El consumo de estos aparatos ha sido calculado a partir de los datos obtenidos en [2], en la cual hay informaciÓn sobre lo que consumen para una potencia de planta determinada.

La potencia que necesitan estos aparatos las hemos definido como:

- $\dot{W}_{auxiliar}$: Potencia que necesitan los elementos auxiliares para funcionar.

La potencia total de nuestra planta la definimos entonces como la potencia generada por las turbinas, menos la potencia necesaria para que funcionen las bombas, y menos la potencia de los elementos auxiliares.

$$\dot{W}_{bombas} = \sum_{i=1}^n \dot{W}_{bomba} \quad (19)$$

$$\dot{W}_{turbinas} = \sum_{i=1}^n \dot{W}_{turbinas} \quad (20)$$

$$\dot{W}_{neta} = (\dot{W}_{turbinas} - \dot{W}_{bombas}) * \eta \quad (21)$$

$$\dot{W}_{total} = \dot{W}_{neta} - \dot{W}_{auxiliares} \quad (22)$$

Por último, se ha definido el rendimiento segÚn la ecuaciÓn 23.

$$\eta_1 = \frac{\dot{W}_{total}}{\dot{Q}_{Fuel}} \quad (23)$$

Este dato nos da información sobre la porción de energía que somos capaces de aprovechar con respecto a la potencia que nos aporta el combustible.

Los valores de presión, temperatura, entalpía y flujos máicos obtenidos del ciclo de vapor se muestran en la Tabla 4.

CENTRAL TÉRMICA SIN ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA				
Punto	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía(kJ/kg)	Flujo máico (kg/s)
1	168,50	565,0	3470,3	153,2
2	43,00	364,3	3120,9	153,2
3	43,00	364,3	3120,9	9,188
4	43,00	364,3	3120,9	144
5	38,00	565,0	3595,9	144
6	24,20	497,5	3457,5	144
7	24,20	497,5	3457,5	6,64
8	24,20	497,5	3457,5	137,4
9	12,00	401,9	3264,6	137,4
10	12,00	401,9	3264,6	9,788
11	12,00	401,9	3264,6	123,3
12	12,00	401,9	3264,6	4,272
13	0,07	39,0	2390,7	4,272
14	4,40	283,2	3030,6	123,3
15	4,40	283,2	3030,6	7,43
16	4,40	283,2	3030,6	115,9
17	0,80	124,8	2727,9	115,9
18	0,80	124,8	2727,9	3,735
19	0,80	124,8	2727,9	112,2
20	0,35	72,7	2604,1	112,2
21	0,35	72,7	2604,1	5,259
22	0,35	72,7	2604,1	106,9
23	0,07	39,0	2396,1	106,9
24	0,07	39,0	2396,1	111,2
25	0,07	39,0	163,3	111,2
26	33,00	39,2	167,0	111,2
27	0,35	44,2	185,0	16,42
28	31,00	69,7	294,3	111,2
29	0,80	74,7	312,7	11,17
30	29,00	90,5	381,3	111,2
31	4,40	95,5	400,4	7,43
32	27,00	132,1	557,1	111,2
33	11,00	184,0	781,4	136,8
34	24,20	193,0	821,5	15,83
35	214,50	188,0	808,7	136,8
36	210,00	219,3	946,2	136,8
37	43,00	224,3	963,7	9,188
38	204,90	251,0	1091,1	136,8

Tabla 4. Propiedades termodinámicas de los puntos del ciclo de vapor para una central térmica sin almacenamiento de energía.

En la Tabla 5, se da información relacionada con la potencia de las turbinas, bombas, intercambiadores, caldera, además de la potencia total de nuestra planta.

$\dot{Q}_{ECONOMIZADOR}$ (kW)	101569	$\dot{W}_{BOMBA}2$ (kW)	3734
$\dot{Q}_{EVAPORADOR}$ (kW)	112595	$\dot{W}_{TURBINA}4$ (kW)	53544
$\dot{Q}_{SOBRECALENTADOR}1$ (kW)	75191	$\dot{W}_{TURBINA}B$ (kW)	19935
$\dot{Q}_{SOBRECALENTADOR}2$ (kW)	75191	$\dot{W}_{TURBINA}C$ (kW)	26496
$\dot{Q}_{RECALENTADOR}$ (kW)	68414	$\dot{W}_{TURBINA}D$ (kW)	3734
$\dot{Q}_{CALDERA}$ (kW)	432960	$\dot{W}_{TURBINA}E$ (kW)	28857
\dot{Q}_{FUEL} (kW)	451000	$\dot{W}_{TURBINA}F$ (kW)	35084
$\dot{Q}_{INTERCAMBIADOR}A$ (kW)	14149	$\dot{W}_{TURBINA}G$ (kW)	13885
$\dot{Q}_{INTERCAMBIADOR}B$ (kW)	9673	$\dot{W}_{TURBINA}H$ (kW)	22242
$\dot{Q}_{INTERCAMBIADOR}C$ (kW)	19543	$\dot{W}_{AUXILIARES}$ (kW)	7617
$\dot{Q}_{INTERCAMBIADOR}D$ (kW)	18811	\dot{W}_{NETA} (kW)	197638
$\dot{Q}_{INTERCAMBIADOR}E$ (kW)	19819	\dot{W}_{TOTAL} (kW)	190021
$\dot{W}_{BOMBA}1$ (kW)	409,6	η	0,4213

Tabla 5. Potencia principales aparatos central térmica sin almacenamiento de energía.

Cabe destacar entre todos estos datos, los valores del flujo másico uno, además de la potencia total, que es la potencia que nuestra planta es capaz de dar a carga total, y el rendimiento de nuestra planta a carga total.

3 Almacenamiento de energía en una central térmica con lecho fluido circulante.

En este apartado, vamos a proceder a explicar cómo hemos realizado la simulación en el programa informático EES, de una central térmica con lecho fluido circulante y con almacenamiento de energía en silos.

Cómo ya se explicó anteriormente, una central térmica con almacenamiento de energía en silos tiene como característica principal el almacenamiento de energía. La caldera de esta central es similar a la de una central térmica convencional. La diferencia, con respecto a esta central, reside en los lechos circulantes. Éstos se calientan en la caldera, y se almacenan en dos silos diferentes según la demanda sea alta o baja. Para ello se realiza la siguiente estrategia. Nuestra planta va a trabajar a carga continua, es decir a máxima potencia; esto es diferente con respecto a una central térmica normal, ya que en éstas la potencia que producen puede variar en algún momento, trabajando a carga parcial. Por consiguiente, en nuestra planta, en períodos de baja demanda, manteniendo la producción de energía constante, produciremos más energía que la necesaria para satisfacer la demanda. Esta energía sobrante, se usará para calentar los lechos, los cuales se almacenarán en un silo de alta temperatura. Posteriormente, en períodos de alta demanda de potencia, nuestra central seguirá trabajando a carga total, sin embargo, en este caso la potencia necesaria para cubrir la demanda eléctrica es

superior a la potencia que nuestra planta es capaz de generar. En esta situación, es cuando usamos la energía almacenada en los silos para poder cubrir toda la demanda eléctrica. Usamos este calor almacenado en los silos, para que, a través de una serie de intercambiadores, generar calor.

El calor generado en la combustión se mantiene constante, ya que hemos considerado que nuestra planta trabaja a carga completa durante todo el año, y, por consiguiente, el calor de la caldera también se mantendrá constante. En la central térmica convencional el calor de la caldera es la suma de todo el calor que se utiliza para calentar el vapor de agua en los distintos equipos, es decir en el economizador, evaporador, sobrecalentadores y recalentador. Sin embargo, en la central térmica con almacenamiento de energía en silos, el calor generado en la caldera se utiliza para generar el vapor de agua necesario para cubrir la demanda, y el calor restante para calentar los lechos. Por tanto, hemos definido el calor de la caldera según la ecuación 24.

$$\dot{Q}_{caldera} = \dot{Q}_{Recalentador} + \dot{Q}_{Sobrecalentador_1} + \dot{Q}_{Sobrecalentador_2} + \dot{Q}_{Evaporador} + \dot{Q}_{Economizador} + \dot{Q}_{ALMACENADO} \quad (24)$$

Podemos observar cómo nos aparece el término $\dot{Q}_{ALMACENADO}$, en la ecuación 24, que hará referencia a la diferencia de calor que hay entre el calor generado por la caldera, el cual es constante, y el calor demandado.

A su vez el calor almacenado, lo definimos como el calor de la caldera multiplicado por un porcentaje de este, que será mayor o menor en función de la demanda eléctrica.

$$\dot{Q}_{almacenado} = \dot{Q}_{caldera} * X_{almacenado} \quad (25)$$

Se ha definido un nuevo rendimiento para este caso, ya que el anterior no nos sirve para esta planta.

$$\eta_{real} = \frac{\dot{W}_{Ttotal}}{(\dot{Q}_{Fuel} - \dot{Q}_{Almacenado}) * 0,96} \quad (26)$$

La expr. 26 sí que nos da una idea de cómo varía el rendimiento de nuestra planta con almacenamiento de energía, ya que tiene en cuenta la energía almacenada. Es importante destacar que el ciclo de vapor que se ha utilizado en la simulación de la central térmica convencional, y el ciclo de vapor usado en la central térmica con almacenamiento de energía es el mismo.

Vamos a explicar el proceso para obtener la demanda ajustada para un día típico de verano. Posteriormente haré lo mismo para los días de otoño, invierno y primavera. Los resultados de estos tres últimos cálculos se pueden ver en el Anexo 1. Lo primero que hemos hecho ha sido elegir un día estándar de esta estación, en este caso un día de julio. A continuación, hemos buscado la demanda eléctrica peninsular de este día [8]. La Fig. 8. muestra la información sobre la demanda de electricidad por hora de un día de verano.

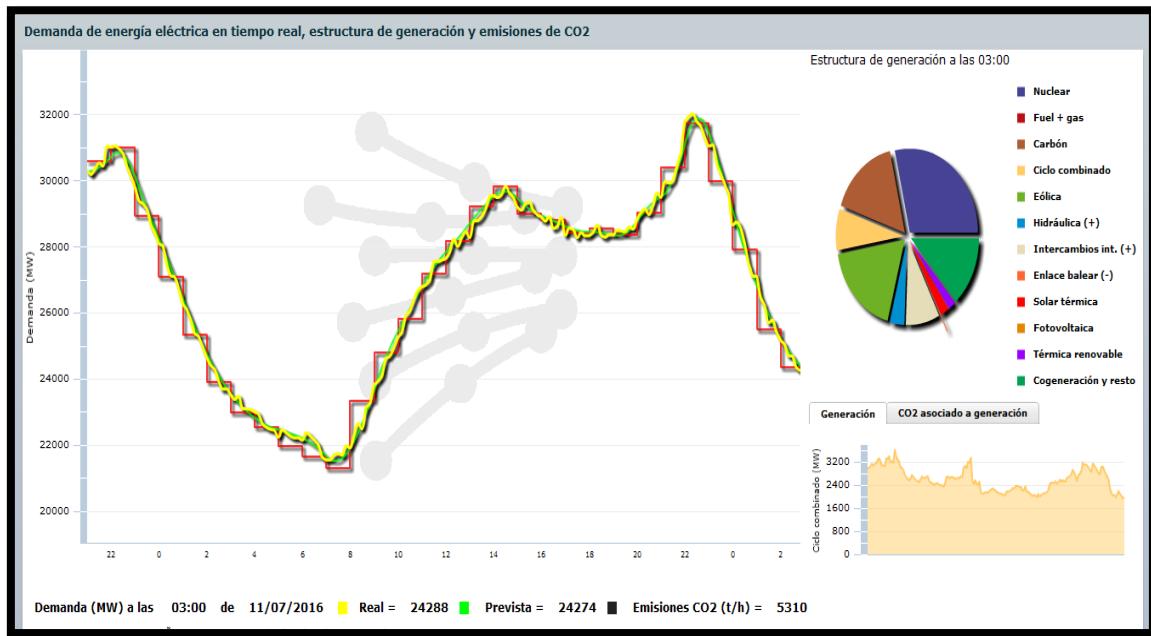


Fig. 8. Demanda eléctrica de un día típico de verano.

La línea amarilla representa la demanda eléctrica. Sin embargo, estos datos hacen referencia a la demanda peninsular, y por tanto necesitamos cuantificarlos para poder utilizarlos en nuestra central, ya que ésta no puede hacer frente a toda esa energía. Para ello, se ha obtenido la demanda para cada hora de dicho día. A continuación, se ha sacado la potencia media de este día, sumando todas las demandas por hora y dividiendo entre las veinticuatro horas que tiene un día. Se ha considerado este valor, como el valor al cual trabajaría una única planta nacional a carga total. Posteriormente, se ha obtenido el factor de demanda, dividiendo la demanda eléctrica de cada hora, entre este valor de referencia, obteniendo valores mayores, y menores que uno. Este último dato nos da información sobre si la demanda es superior a la potencia nominal, o es inferior. A continuación, hemos multiplicado la potencia nominal de nuestra planta, por el factor de demanda, obteniendo valores de potencia asequibles para nuestra central.

La ecuación 27, la hemos usado para obtener la demanda media, la 28 para obtener el factor de demanda, y por último la 29 para calcular la demanda ajustada.

$$Demand_{media} = \sum_{i=1}^{24} \frac{Demand_i}{24} \quad (27)$$

$$Factor_{demanda} = \frac{Demand_i}{Demand_{media}} \quad (28)$$

$$Demandada_{ajustada} = Factor_{demanda} * Potencia_{nominal} \quad (29)$$

En la Tabla 6, podemos ver estos resultados.

VERANO					
HORA	Demandada (MWh)	Demandada media (GW)	Factor de demanda	Potencia nominal (kW)	Demandada ajustada (MWh)
0	28672	32,12	0,893	190021	169,63
1	27105	32,12	0,844	190021	160,36
2	25181	32,12	0,784	190021	148,97
3	24288	32,12	0,756	190021	143,69
4	23734	32,12	0,739	190021	140,413
5	23787	32,12	0,740	190021	140,73
6	24774	32,12	0,771	190021	146,57
7	26698	32,12	0,831	190021	157,95
8	29690	32,12	0,924	190021	175,65
9	32657	32,12	1,016	190021	1932,03
10	34975	32,12	1,089	190021	206,92
11	36339	32,12	1,131	190021	214,99
12	37151	32,12	1,157	190021	219,79
13	38073	32,12	1,185	190021	225,24
14	37836	32,12	1,178	190021	223,84
15	37408	32,12	1,165	190021	221,31
16	36877	32,12	1,148	190021	218,17
17	37008	32,12	1,152	190021	218,94
18	36626	32,12	1,140	190021	216,68
19	35772	32,12	1,114	190021	211,63
20	35010	32,12	1,089	190021	207,12
21	34221	32,12	1,065	190021	202,46
22	34331	32,12	1,069	190021	202,99
23	32665	32,12	1,017	190021	193,25

Tabla 6. Demanda ajustada para un día típico de verano.

Podemos observar cómo en un día típico de verano, hay momentos del día en los que somos capaces de cubrir la demanda sin necesidad de usar la energía almacenada. Sin embargo, hay otros momentos en los que necesitamos usar la energía almacenada. Esto lo podemos saber gracias al factor de demanda, siendo este menor que uno cuando la demanda es inferior a la potencia nominal, y a la inversa.

Ajustando la potencia total de nuestra planta por hora a la demanda horaria, los parámetros principales de nuestra central van a cambiar en cada hora. La forma de observar estos cambios se ha conseguido haciendo tablas paramétricas. Estas tablas, permiten introducir todas las variables que queramos, indicando cuál va a ser la variable paramétrica, es decir aquella que nosotros vamos a poder ajustar, que va a hacer que las variables que dependan de esta cambien. En nuestro caso esta variable va a ser la potencia total que será igual a la demanda horaria. Vamos a hacer cuatro tablas

paramétricas que hacen referencia a cuatro días típicos de cada una de las estaciones del año. Cada una de estas tablas tendrá veinticuatro filas, ya que la demanda varía en cada hora, modificando el resto de variables que dependen de la potencia total.

3.1 Simulación de una central térmica con almacenamiento de energía.

En las horas, en las cuales la demanda eléctrica es más baja, nuestra planta es capaz de satisfacer la demanda sin necesidad de usar todo el calor de la caldera. Por tanto, podemos usar el calor restante para calentar los lechos y almacenarlos en un silo de alta temperatura. El igualar la potencia total que es capaz de dar nuestra planta a la demanda eléctrica va a hacer que los flujos máscicos varíen en cada hora, modificándose para obtener la potencia necesaria. Sin embargo, como hemos explicado anteriormente, como el calor de la caldera es fijo, ante un menor calor necesario en el ciclo de vapor, el resto de calor será usado para calentar los lechos, y por tanto para almacenarlos en los silos de alta temperatura. De tal forma que, en aquellas horas en las cuales la demanda es inferior a la potencia nominal de nuestra planta, esta es capaz de almacenar energía. Este hecho se aprecia en el EES, porque cuando se almacena energía la variable X , ecuación 25, toma valores positivos.

3.2 Simulación de una central térmica con recuperación de energía.

El proceso de recuperación de energía es el contrario al de almacenamiento. Será necesario usar la energía almacenada, cuando la demanda eléctrica supere la potencia que nuestra planta es capaz de generar en estado nominal. En estos casos, será necesario usar la energía previamente almacenada en los silos en momentos de baja demanda, para a través de un intercambiador, generar más vapor de agua, y por consiguiente más energía. En las horas en las que ocurre este fenómeno, la variable X , ecuación 25, es negativa, ya que se necesita de un aporte de energía extra para poder cubrir dicha demanda. Estos valores negativos se pueden entender, si vemos cómo hemos definido la caldera.

4 **Flexibilidad de una central térmica.**

Las centrales térmicas convencionales, como se explicó anteriormente, trabajan a carga total, y a veces a carga parcial, en función de la demanda que hay, teniendo que variar el proceso de combustión de la caldera. Esta variabilidad en el proceso de combustión no es fácil de ejecutar, ya que requiere de continuos cambios, además de un coste económico añadido. En este aspecto, nuestra central térmica con almacenamiento de energía va a ser ventajosa con respecto a la planta convencional, ya que va a estar trabajando continuamente a carga total, sin necesidad de cambiar la combustión en la caldera. Además, con una sola planta vamos a ser capaces de satisfacer la demanda eléctrica. No ocurriendo esto con las centrales térmicas convencionales, las cuáles necesitan de varias de ellas, para cubrir los picos de la demanda.

Como toda inversión industrial, lo que importa finalmente es la rentabilidad del proyecto. Para ello necesitamos tener información sobre costes y precios. Por tanto, vamos a seleccionar cuatro días, uno de verano, uno de primavera, otro de otoño, y un último de invierno. Y vamos a observar cómo funciona nuestra central en estos cuatro casos, para luego a partir de estos días, generalizar los resultados para cada cuatrimestre, y para un año.

Una vez seleccionados los días, es necesario saber la demanda eléctrica de dichos días, además del precio de la electricidad. Para calcular los ingresos que nos reporta nuestra central, tendremos que multiplicar el precio del kWh eléctrico por los kWh que se nos demanda.

4.1 Demanda eléctrica.

A continuación, se va a analizar el funcionamiento de nuestra planta en cuatro días típicos de las cuatro estaciones del año.

4.1.1 Primavera

Vamos a comprobar, si nuestra planta es capaz de aportar la potencia necesaria en un día típico de primavera.

En la Fig. 9. podemos observar como desde las doce de la noche hasta las nueve de la mañana, nuestra planta es capaz de generar más energía que la necesaria para cubrir la demanda, y, por consiguiente, somos capaces de almacenar energía. Sin embargo, a partir de las ocho de la mañana necesitamos usar la energía almacenada para cubrir la demanda.

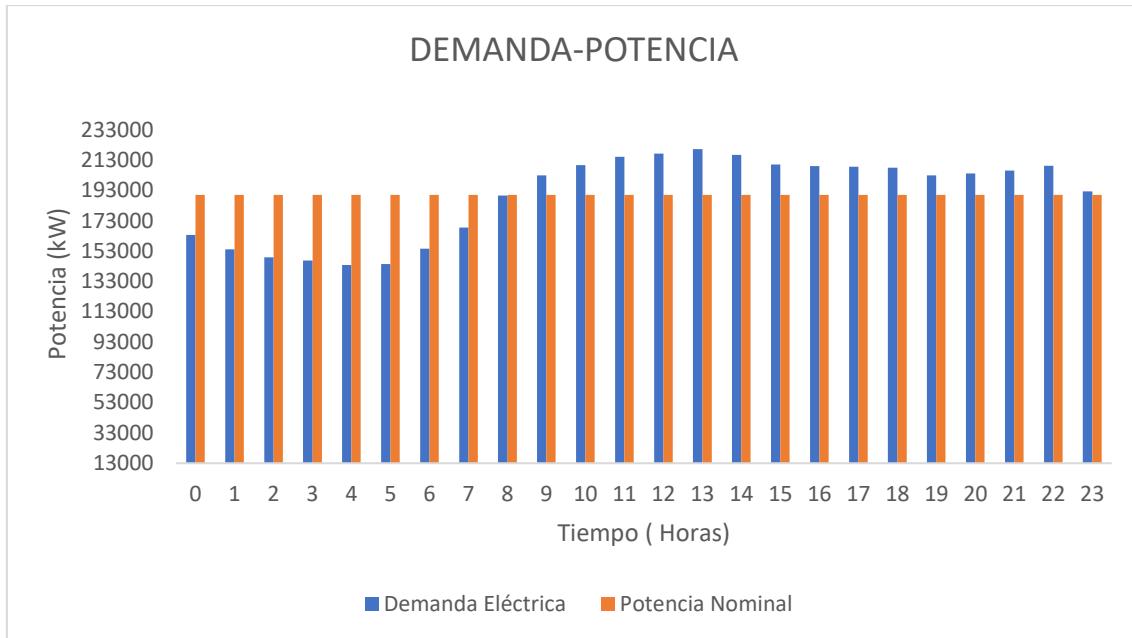


Fig. 9. Demanda eléctrica, y potencia nominal frente al tiempo en un día típico de primavera.

Vamos a comprobar si nuestra planta es capaz de cubrir esta demanda para un día típico de primavera. En la Tabla 7, se muestran los parámetros más importantes de nuestra central para un día típico de primavera, habiendo ajustado la potencia total de nuestra planta a la demanda eléctrica por hora.

Sabiendo que la potencia que es capaz de dar nuestra planta a carga total es 190 MW, podemos observar como cuando la demanda es menor que dicha potencia, almacenamos energía, y cuando la demanda eléctrica es mayor que la potencia nominal, necesitamos usar esa energía almacenada para cubrir dicha demanda. En la tabla los valores en color rojo son aquellos en los que se almacena energía. Los que aparecen en color verde son aquellos en los que se usa esta energía almacenada. También podemos observar como la potencia neta va variando, ya que la potencia total cada vez es diferente, al igual que el flujo mísico del ciclo de vapor, que aumenta o disminuye con respecto al nominal. También podemos observar la variación del rendimiento; cómo este va mejorando conforme se usa almacenamiento de energía. Sin embargo, lo más importante para nosotros va a ser que en un día típico de primavera, nuestra planta es capaz de satisfacer toda la demanda eléctrica, ya que, en la Tabla 7, la variable almacenamiento, que da cuenta del calor almacenado (suma de la variable calor almacenado) en ningún momento es negativa, indicando que siempre ha habido suficiente energía para cubrir la demanda.

PRIMAVERA								
Hora	X_{almac}	ALMAC (kWh)	\dot{Q}_{almac} (kWh)	\dot{W}_{neta} (kWh)	\dot{W}_{total} (kWh)	$\dot{Q}_{caldera}$ (kW)	rendimiento	\dot{m}_1 (Kg/s)
0	0,1392	60276	60276	170123	163566	432960	0,4019	131,9
1	0,1885	141908	81632	160374	154194	432960	0,4008	124,3
2	0,2167	235752	93844	154800	148834	432960	0,4001	120
3	0,2273	334159	98408	152717	146831	432960	0,3998	118,4
4	0,2431	439405	105246	149595	143830	432960	0,3993	116
5	0,2401	543374	103968	150178	144390	432960	0,3994	116,4
6	0,1871	624382	81009	160659	154467	432960	0,4008	124,6
7	0,1132	673397	49015	175264	168509	432960	0,4024	135,9
8	0,00186	674202	805,2	197270	189668	432960	0,4044	152,9
9	-0,0680	644742	-29460	211086	202951	432960	0,4055	163,6
10	-0,1038	599784	-44959	218160	209753	432960	0,406	169,1
11	-0,1326	542379	-57404	223842	215215	432960	0,4064	173,5
12	-0,1436	480224	-62155	226010	217300	432960	0,4065	175,2
13	-0,1592	411278	-68946	229110	220281	432960	0,4067	177,6
14	-0,1395	350883	-60395	225207	216527	432960	0,4065	174,6
15	-0,106	305006	-45878	218580	210156	432960	0,406	169,5
16	-0,1001	261667	-43339	217421	209042	432960	0,406	168,6
17	-0,0980	219232	-42435	217009	208645	432960	0,4059	168,2
18	-0,0951	178058	-41173	216433	208091	432960	0,4059	167,8
19	-0,0684	148411	-29647	211171	203033	432960	0,4055	163,7
20	-0,0748	115992	-32419	212437	204249	432960	0,4056	164,7
21	-0,0843	79491	-36501	214300	206041	432960	0,4057	166,1
22	-0,1016	35483	-44008	217727	209336	432960	0,406	168,8
23	-0,0122	30167	-5316	200065	192354	432960	0,4047	155,1

Tabla 7. Parámetros principales central térmica con almacenamiento de energía en un día típico de primavera.

En la Fig. 10. podemos observar como varía el rendimiento de nuestra planta en función de la cantidad almacenada. Podemos observar lo dicho anteriormente: que cuando almacenamos el rendimiento es peor; sin embargo, cuando usamos el calor almacenado, el rendimiento mejora.

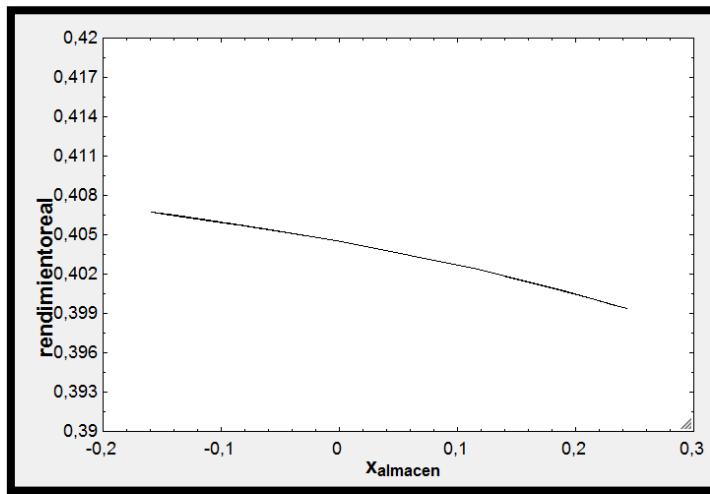


Fig. 10. Rendimiento de nuestra planta con almacenamiento de energía en función de la cantidad almacenada en un día de primavera.

En la Fig. 11. podemos observar la energía almacenada en función del tiempo. Esta gráfica es muy importante, ya que nos da información sobre si nuestra planta es capaz de satisfacer la demanda energética o no. Podemos observar como desde las doce de la noche hasta las ocho de la mañana, nuestra planta es capaz de almacenar energía, ya que la demanda es inferior a la potencia que es capaz de generar nuestra planta en estado nominal. A partir de entonces, necesitamos usar esta potencia para cubrir la demanda eléctrica, y por eso la potencia almacenada va disminuyendo hasta llegar casi a cero. También podemos llegar a la conclusión de que nuestra planta es capaz de satisfacer la demanda de un día típico de primavera, ya que en ningún momento la energía almacenada ha salido negativa. Una energía almacenada negativa significaría que no tenemos suficiente energía para cubrir la demanda.

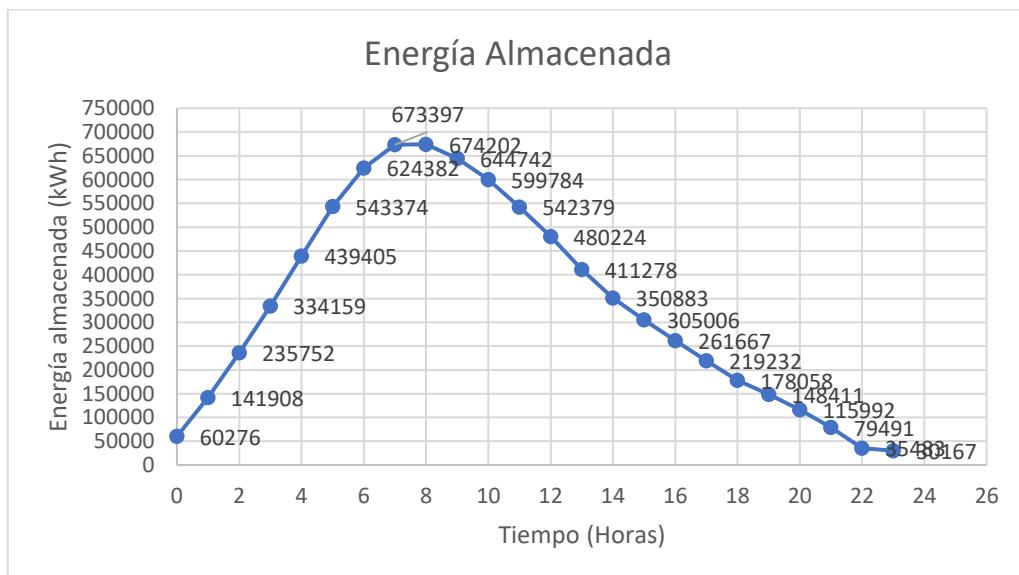


Fig. 11. Energía almacenada en función del tiempo en un día de primavera.

4.1.2 Verano

La demanda eléctrica para un día típico de verano, la podemos ver en la Fig. 12. al igual que la potencia nominal de nuestra planta. Observamos, como nuestra planta es capaz de almacenar energía desde las doce de la noche hasta las ocho de la mañana, a partir de esta hora, necesitamos usar la energía almacenada para cubrir la demanda, ya que esta es superior a la potencia nominal.

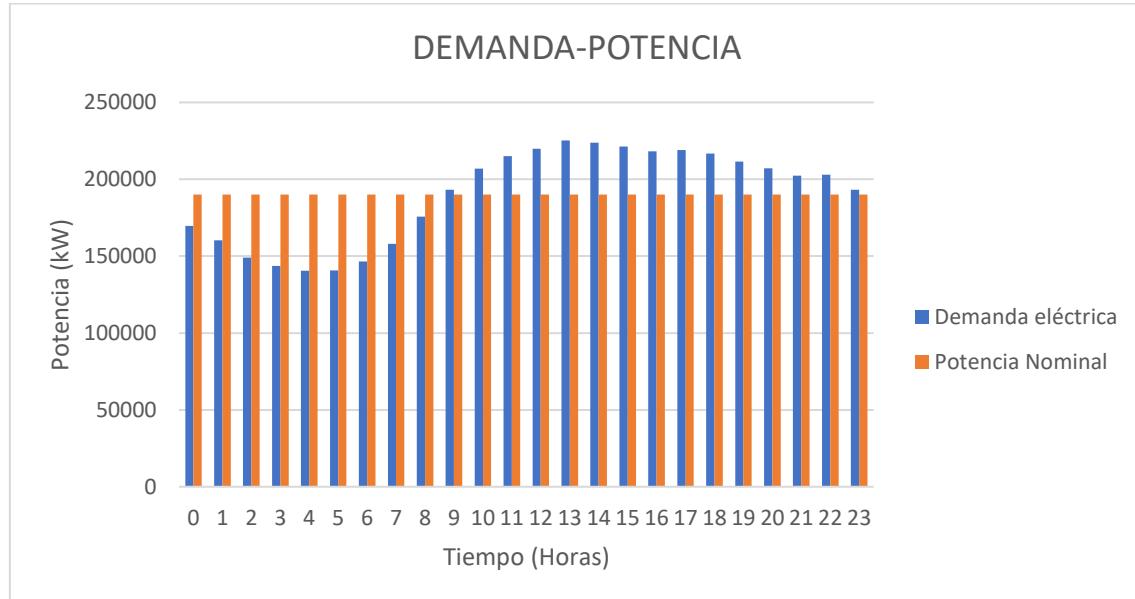


Fig. 12. Potencia nominal y demanda eléctrica en un día típico de verano.

En la Tabla 8, podemos observar los principales parámetros de nuestra planta para un día típico de verano. Ajustando la potencia de nuestra planta a la potencia total y observando cómo varían el resto de variables. En esta tabla, como en el caso de primavera aparecen en rojo las horas, en las cuales la demanda es inferior a la potencia nominal, y podemos almacenar energía, sin embargo, en verde aparecen aquellas horas en las cuales la demanda es superior a la potencia nominal, y, por tanto, hay que usar la energía almacenada. Cabe destacar que la variable almacenada que recoge la información sobre la energía almacenada en ningún momento es negativa, indicando que nuestra planta es capaz de cubrir la demanda en cualquier momento. La primera fila, hace referencia a la energía que hemos sido capaces de almacenar al final de un día de primavera.

VERANO								
Hora	X_{almac}	ALMAC (kWh)	\dot{Q}_{almac} (kWh)	\dot{W}_{neta} (kWh)	\dot{W}_{total} (kWh)	$\dot{Q}_{caldera}$ (kW)	Rendimiento	\dot{m}_1 (Kg/s)
Primavera		30167						
0	0,1073	76643	46476	176422	169623	432960	0,4025	136,8
1	0,1561	144241	67598	166780	160353	432960	0,4015	129,3
2	0,216	237774	93533	154942	148970	432960	0,4001	120,1
3	0,2438	343344	105570	149447	143687	432960	0,3993	115,9
4	0,2611	456382	113038	146038	140410	432960	0,3988	113,2
5	0,2594	568705	112323	146364	140724	432960	0,3989	113,5
6	0,2287	667724	99019	152438	146563	432960	0,3997	118,2
7	0,1688	740809	73084	164276	157945	432960	0,4012	127,4
8	0,0756	773563	32754	182686	175646	432960	0,4032	141,6
9	-0,01672	766323	-7240	200943	193198	432960	0,4047	155,8
10	-0,08889	727837	-38485	215206	206912	432960	0,4058	166,8
11	-0,1314	670966	-56871	223598	214981	432960	0,4064	173,3
12	-0,1566	603149	-67817	228595	219785	432960	0,4067	177,2
13	-0,1853	522905	-80245	234268	225239	432960	0,407	181,6
14	-0,178	445855	-77050	232810	223837	432960	0,4069	180,5
15	-0,1646	374574	-71281	230176	221305	432960	0,4068	178,4
16	-0,1481	310450	-64123	226909	218164	432960	0,4066	175,9
17	-0,1522	244561	-65889	227715	218939	432960	0,4066	176,5
18	-0,1403	183821	-60740	225364	216679	432960	0,4065	174,7
19	-0,1137	134593	-49228	220110	211627	432960	0,4061	170,6
20	-0,08998	95636	-38957	215421	207119	432960	0,4058	167
21	-0,06541	67314	-28322	210566	202451	432960	0,4055	163,2
22	-0,06824	37767	-29547	211125	202989	432960	0,4055	163,7
23	-0,01697	30419	-7348	200992	193246	432960	0,4047	155,8

Tabla 8. Parámetros principales central térmica con almacenamiento de energía en un día típico de verano.

En la Fig. 13. podemos observar la variación del rendimiento frente a la cantidad almacenada en un día típico de verano. Se puede observar la pequeña variación que se produce en el rendimiento de nuestra planta frente a la proporción almacenada, manteniéndose prácticamente constante.

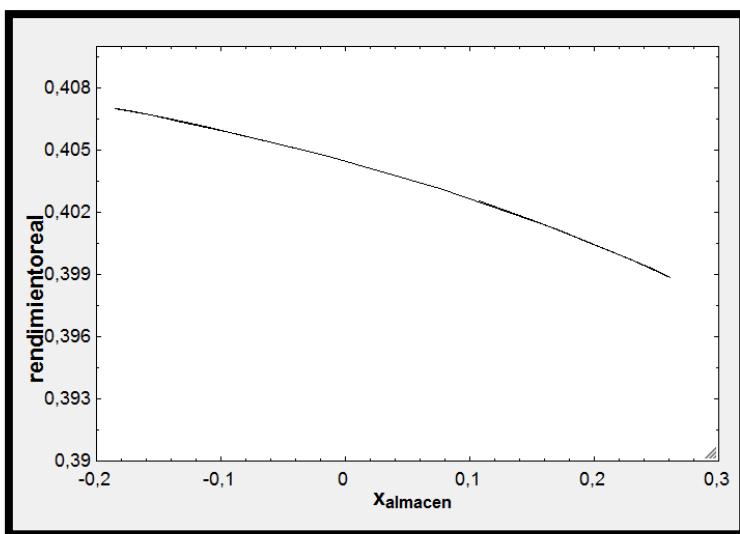


Fig. 13. Rendimiento frente a la x almacenada en un día típico de verano.

La Fig. 14. es la más importante para este periodo, ya que da cuenta de la energía almacenada en nuestra central frente al tiempo, en un día típico de verano. Esta gráfica nos muestra que, desde las doce de la noche hasta las ocho de la mañana nuestra planta genera más potencia que la demandada, y por tanto podemos almacenar energía, sin embargo, desde las ocho de la mañana hasta las doce de la noche necesitamos usar esta energía almacenada para cubrir la demanda, ya que esta es superior a la potencia nominal de nuestra planta. Lo más importante de esta gráfica, es que en ningún momento sale negativo, lo cual indicaría que no hay suficiente potencia en nuestra planta para cubrir la demanda.

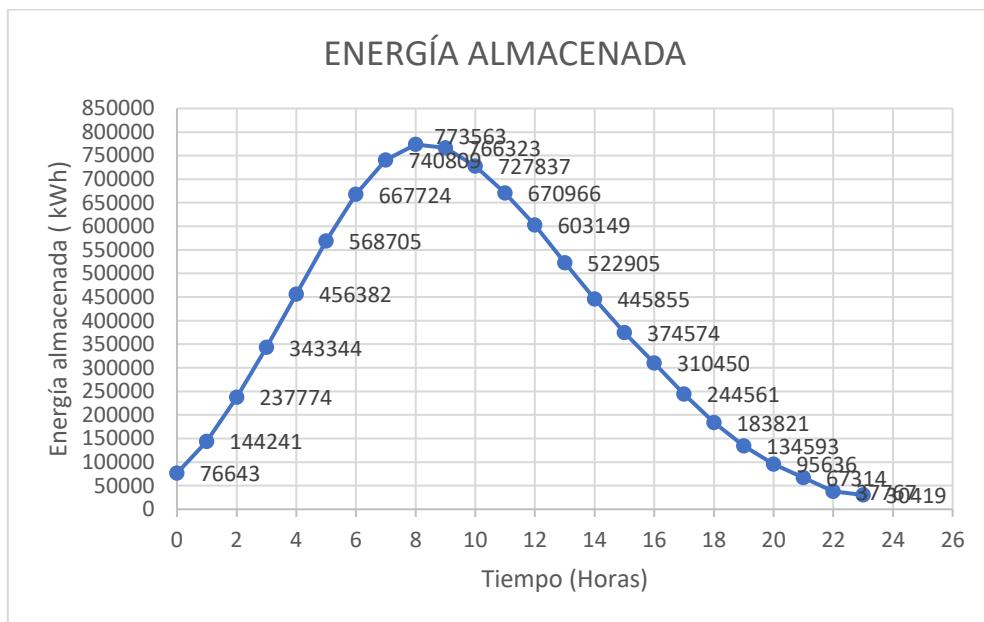


Fig. 14. Energía almacenada en función del tiempo en un día típico de verano

4.1.3 Otoño

En la Fig. 15. podemos observar la demanda eléctrica y potencia nominal de nuestra planta frente al tiempo, en un día típico de otoño. En esta gráfica, podemos observar como nuestra planta es capaz de generar más potencia que la demandada hasta las siete de la mañana, hora a partir de la cual la demanda supera a la potencia nominal.

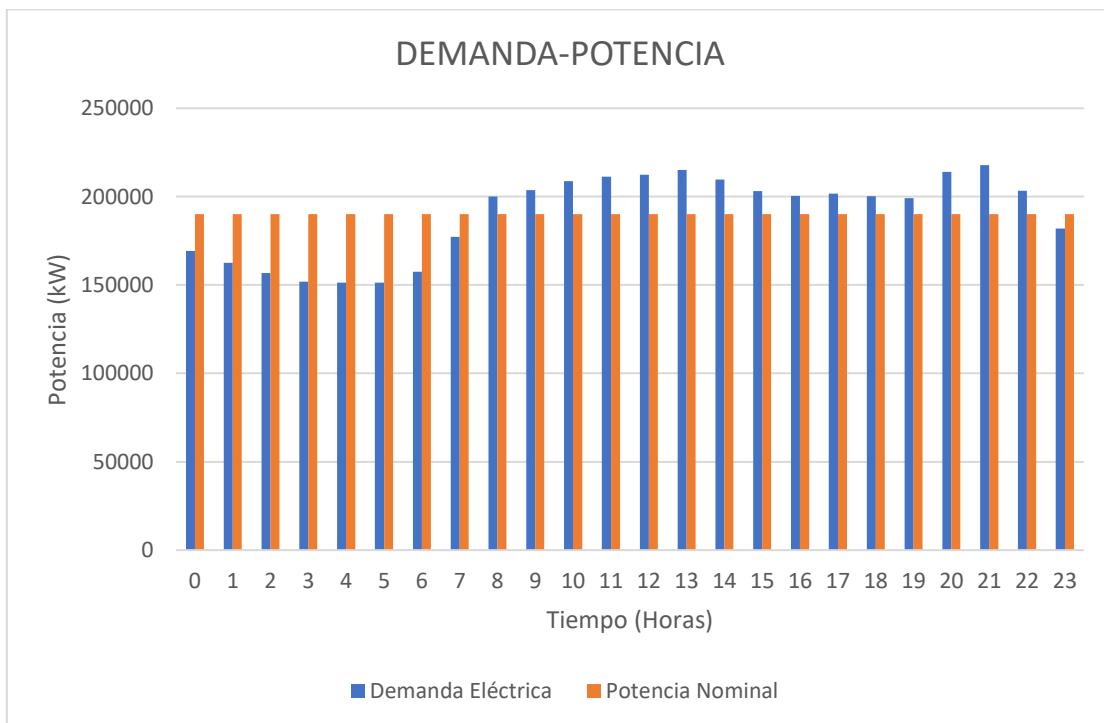


Fig. 15. Demanda y potencia frente al tiempo en un día típico de otoño.

En la Tabla 9, podemos observar los principales parámetros de operación de nuestra planta para un día típico de otoño. En esta tabla, como en las estaciones anteriores, aparece en color rojo los momentos en los cuales nuestra planta es capaz de almacenar energía, y en color verde los momentos en los cuales necesitamos usar la energía almacenada para cubrir la demanda. La primera fila hace referencia a la energía que hemos sido capaces de almacenar en un día típico de verano, y que podremos usar en la estación de otoño.

OTOÑO								
Hora	X_{almac}	ALMAC (kWh)	\dot{Q}_{almac} (kWh)	\dot{W}_{neta} (kWh)	\dot{W}_{total} (kWh)	$\dot{Q}_{caldera}$ (kW)	rendimiento	\dot{m}_1 (Kg/s)
VERA NO		30419			0			
0	0,1091	77671	47252	176068	169283	432960	0,4025	136,5
1	0,1443	140134	62464	169124	162606	432960	0,4018	131,1
2	0,1745	215688	75554	163149	156861	432960	0,4011	126,5
3	0,2006	302522	86834	158000	151911	432960	0,4005	122,5
4	0,2032	390479	87957	157487	151418	432960	0,4004	122,1
5	0,2038	478716	88238	157359	151294	432960	0,4004	122
6	0,1715	552959	74243	163747	157437	432960	0,4012	126,9
7	0,06748	582176	29216	184301	177198	432960	0,4033	142,9
8	-0,05252	559438	-22738	208017	200000	432960	0,4053	161,3
9	-0,07223	528166	-31272	211913	203746	432960	0,4056	164,3
10	-0,09904	485286	-42880	217212	208840	432960	0,4059	168,4
11	-0,112	436789	-48497	219775	211305	432960	0,4061	170,4
12	-0,1176	385874	-50915	220879	212367	432960	0,4062	171,2
13	-0,1319	328781	-57093	223700	215078	432960	0,4064	173,4
14	-0,1033	284060	-44721	218052	209648	432960	0,406	169
15	-0,06902	254177	-29884	211279	203136	432960	0,4055	163,8
16	-0,05482	230440	-23736	208473	200439	432960	0,4053	161,6
17	-0,06127	203911	-26529	209748	201664	432960	0,4054	162,6
18	-0,05345	180768	-23144	208202	200178	432960	0,4053	161,4
19	-0,04816	159918	-20850	207155	199172	432960	0,4052	160,6
20	-0,1261	105336	-54581	222553	213976	432960	0,4063	172,5
21	-0,1462	42049	-63287	226527	217797	432960	0,4066	175,6
22	-0,06971	11869	-30180	211414	203267	432960	0,4055	163,9
23	0,04283	30414	18545	189173	181882	432960	0,4038	146,7

Tabla 9. Parámetros principales central térmica con almacenamiento de energía en un día típico de otoño.

En la Fig. 16. podemos observar la variación del rendimiento para un día típico de otoño. Se puede observar, la poca variabilidad que tiene el rendimiento de nuestra central frente a la variable X , siendo prácticamente constante.

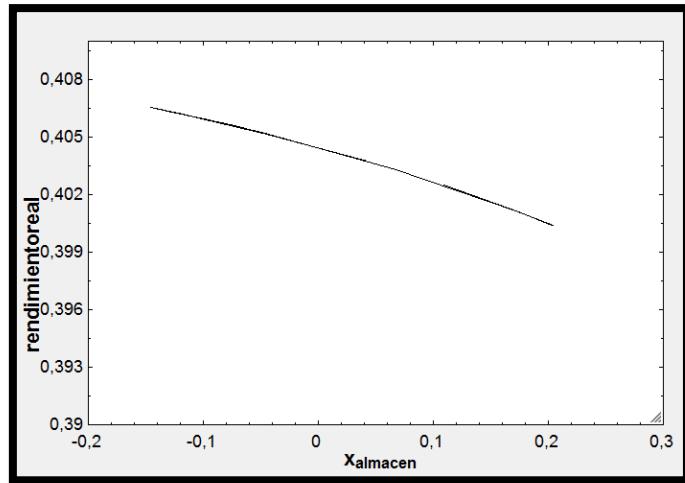


Fig. 16. Rendimiento de nuestra planta frente a la x almacenada en un día típico de otoño.

En la Fig. 17. podemos observar como desde las doce de la noche hasta las siete de la mañana podemos almacenar energía, y a partir de entonces necesitamos usar esta energía para cubrir la demanda. A partir de las diez podemos almacenar energía de nuevo.

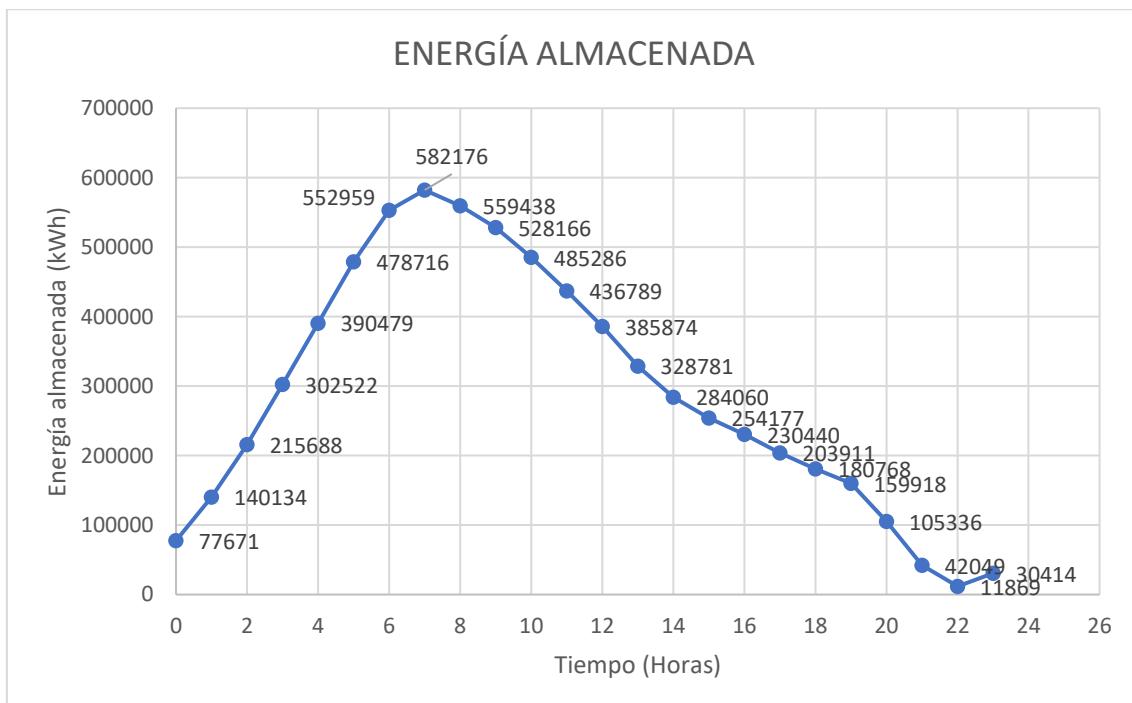


Fig. 17. Energía almacenada frente al tiempo en un día típico de otoño.

4.1.4 Invierno

En la Fig. 18. observamos una vez más la relación potencia nominal y demanda eléctrica para un día típico de invierno. En esta última figura, podemos observar como desde las doce de la noche hasta las siete de la mañana podemos almacenar energía, sin embargo, desde las siete hasta las once de la noche necesitamos usar la energía almacenada para cubrir la demanda.

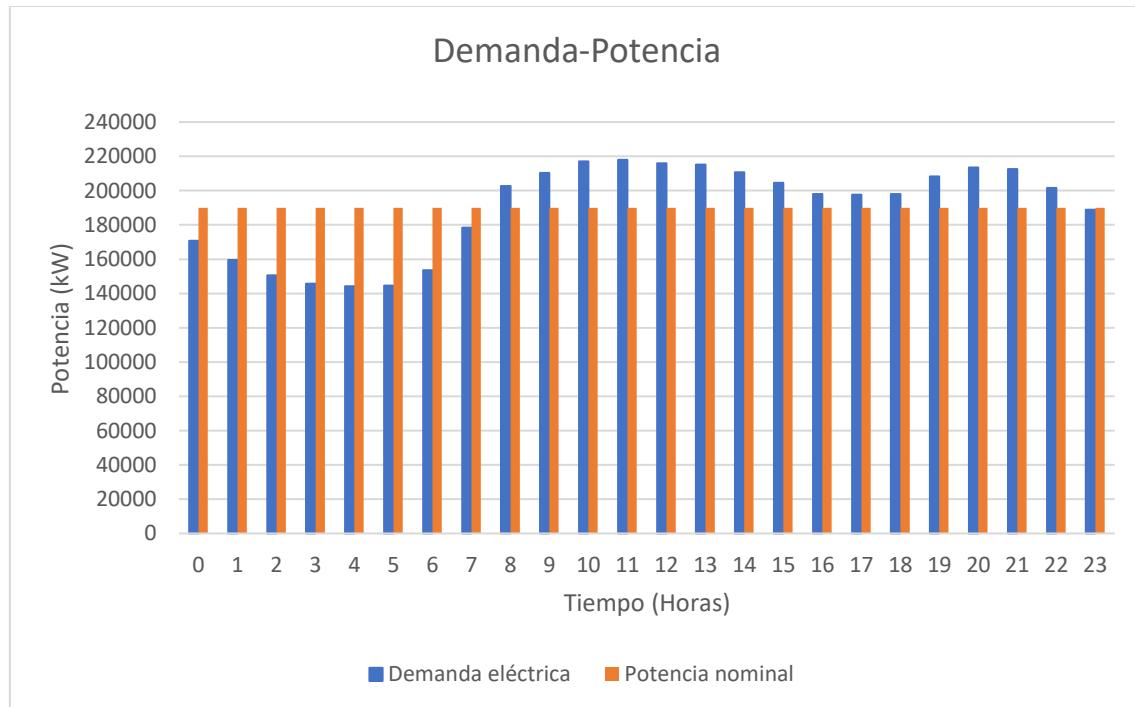


Fig. 18. Demanda eléctrica y potencia nominal frente al tiempo en un día típico de invierno.

Ajustando una vez más la potencia de nuestra planta, a la demanda eléctrica, obtenemos de nuevo la Tabla 10. En esta tabla, podemos observar los principales parámetros de un día típico de invierno. Como en los casos anteriores, en los momentos del día en que la potencia de nuestra planta es superior que la demanda, podemos almacenar energía (valores en rojo). Sin embargo, cuando la demanda es superior a la potencia, necesitamos usar esta energía almacenada para cubrir la demanda (valores en verde). La primera fila de la Tabla 10, hace referencia a la energía que fuimos capaces de almacenar en otoño.

INVIERNO								
Hora	X_{almac}	ALMAC (kWh)	\dot{Q}_{almac} (kWh)	\dot{W}_{neta} (kWh)	\dot{W}_{total} (kWh)	$\dot{Q}_{caldera}$ (kW)	rendimiento	\dot{m}_1 (Kg/s)
OTOÑO		30414			0			
0	0,1017	74431	44017	177545	170702	432960	0,4027	137,6
1	0,1602	143778	69347	165982	159585	432960	0,4014	128,7
2	0,2071	233444	89665	156707	150668	432960	0,4003	121,5
3	0,2334	334487	101043	151513	145674	432960	0,3996	117,5
4	0,2405	438632	104145	150097	144313	432960	0,3994	116,4
5	0,2388	542019	103387	150444	144646	432960	0,3995	116,6
6	0,1917	625034	83014	159743	153587	432960	0,4007	123,8
7	0,06103	651456	26422	185577	178425	432960	0,4034	143,9
8	-0,06699	622450	-29006	210878	202751	432960	0,4055	163,5
9	-0,1065	576336	-46114	218688	210260	432960	0,406	169,5
10	-0,1419	514888	-61447	225687	216989	432960	0,4065	175
11	-0,1473	451098	-63791	226757	218018	432960	0,4066	175,8
12	-0,1363	392089	-59009	224574	215919	432960	0,4064	174,1
13	-0,1322	334868	-57221	223758	215135	432960	0,4064	173,5
14	-0,1094	287521	-47346	219251	210801	432960	0,4061	170
15	-0,07654	254384	-33137	212764	204564	432960	0,4056	164,9
16	-0,04175	236309	-18075	205889	197954	432960	0,4051	159,6
17	-0,03996	219006	-17303	205536	197615	432960	0,4051	159,3
18	-0,04175	200931	-18075	205889	197954	432960	0,4051	159,6
19	-0,0964	159193	-41739	216691	208340	432960	0,4059	168
20	-0,1235	105710	-53483	222052	213494	432960	0,4063	172,1
21	-0,1191	54165	-51546	221167	212644	432960	0,4062	171,5
22	-0,06083	27827	-26338	209660	201580	432960	0,4054	162,5
23	0,005963	30409	2582	196459	188888	432960	0,4044	152,3

Tabla 10. Parámetros principales central térmica con almacenamiento de energía en un día típico de invierno.

En la Fig. 19. podemos observar la variación del rendimiento frente a la cantidad almacenada en un día típico de invierno.

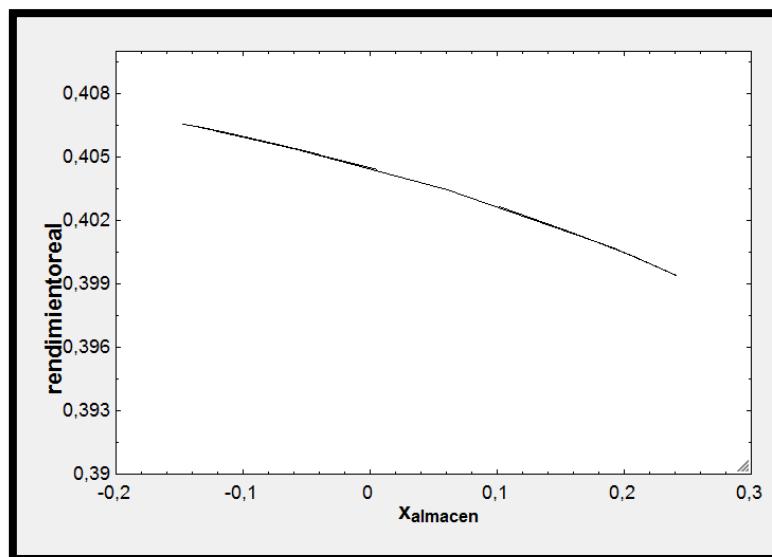


Fig. 19. Rendimiento frente al tiempo en un día de invierno.

En la Fig. 20. podemos observar la energía almacenada en un día típico de verano. Esta gráfica es la más importante de todas, en ella podemos observar como desde las doce de la noche hasta siete de la mañana somos capaces de almacenar energía, y como a partir de esta hora, se necesita usar la energía almacenada para cubrir la demanda. Lo más importante es que esta energía almacenada en ningún momento es negativa, lo cual indica que nuestra planta es capaz de satisfacer la demanda en todo momento.

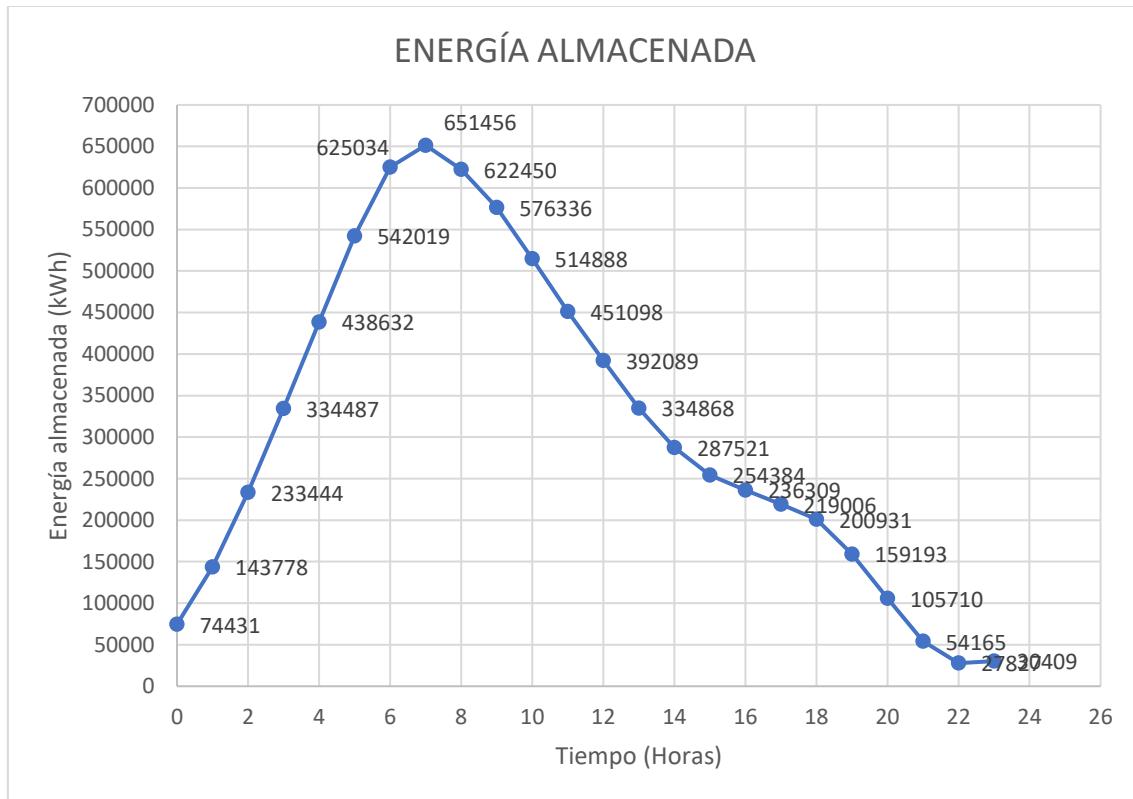


Fig. 20. Energía almacenada en función del tiempo para un día tipo de invierno.

4.2 Rentabilidad Económica.

A continuación, vamos a proceder al análisis económico de una central térmica con almacenamiento de energía, y de una central térmica sin almacenamiento de energía. De esta forma podremos comprobar si nuestra central térmica es ventajosa en términos económicos con respecto a una estándar. Comenzaremos analizando la central térmica sin almacenamiento de energía.

4.2.1 Central térmica sin almacenamiento de energía.

Una central térmica sin almacenamiento de energía, si actúa a carga total es capaz de producir la misma potencia durante todo el tiempo. Vamos a suponer que nuestra central térmica opera a carga total durante un año. Para ello, habrá que calcular los

beneficios económicos que nos reporta vender la electricidad, al igual que los costes de crear esta planta, así como el tiempo de amortización. Lo primero que tenemos que saber es el precio de la electricidad para un día tipo de cada estación. Vamos a explicar cómo hemos hecho los cálculos para un día tipo de primavera, haciendo lo mismo para las otras tres estaciones. Los valores de las otras tres estaciones se pueden ver en el Anexo 2.

En la Fig. 21. podemos observar el precio de la electricidad frente al tiempo en un día tipo de primavera. Este precio es el precio minorista, que las compañías cobran al consumidor final. El precio real al que el propietario de la central vendería el kWh sería inferior, y dependería de las subastas realizadas en el mercado [11]. Cabe destacar la variabilidad de este precio a lo largo de un día, siendo muy bajo a altas horas de la madrugada, donde la demanda es muy baja, y mayor en momentos en los que la demanda es mayor. De dos a seis de la mañana el precio es más bajo, y aumenta a partir de las siete hasta las once, horas en las que se dan los valores máximos.

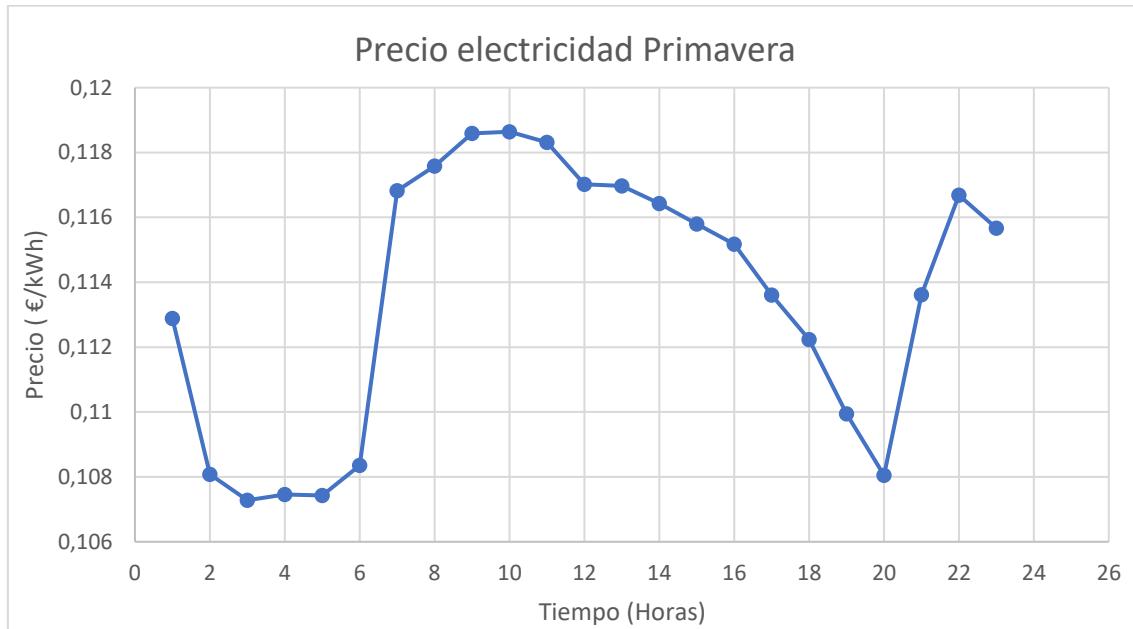


Fig. 21. Precio electricidad frente al tiempo en un día tipo de primavera.

En la Tabla 11, podemos observar los precios de la gráfica anterior con más detalle.

Hora	Precio($\frac{\text{euros}}{\text{kW.h}}$)	Hora	Precio($\frac{\text{euros}}{\text{kW.h}}$)
0	0,11289	12	0,11697
1	0,10808	13	0,11643
2	0,10728	14	0,1158
3	0,10746	15	0,11517
4	0,10743	16	0,11361
5	0,10836	17	0,11223
6	0,11682	18	0,10994
7	0,11758	19	0,10805
8	0,11859	20	0,11362
9	0,11864	21	0,11668
10	0,11831	22	0,11567
11	0,11702	23	0,11233

Tabla 11. Precio de la electricidad por hora en un día típico de primavera.

A continuación, hemos obtenido los ingresos de un día típico de primavera, multiplicando el precio de la electricidad por hora, por la potencia nominal de nuestra planta. Para obtener los resultados, hemos usado las ecuaciones 30,31 y 32.

$$Ingresos_{hora} = Demanda_{hora} * Precio_{hora} \quad (30)$$

$$Ingresos_{diarios} = \sum_{i=1}^n Ingresos_{hora} \quad (31)$$

$$Ingresos_{cuatrimestre} = Ingresos_{diarios} * 80 \quad (32)$$

Obteniendo los valores de la Tabla 12.

PRIMAVERA			
Hora	Precio ($\frac{\text{euros}}{\text{kWh}}$)	Potencia Nominal (kWh)	Ingresos (€)
0	0,11289	190021	21451,47
1	0,10808	190021	20537,47
2	0,10728	190021	20385,45
3	0,10746	190021	20419,66
4	0,10743	190021	20413,96
5	0,10836	190021	20590,67
6	0,11682	190021	22198,25
7	0,11758	190021	22342,67
8	0,11859	190021	22534,59
9	0,11864	190021	22544,09
10	0,11831	190021	22481,38
11	0,11702	190021	22236,26
12	0,11697	190021	22226,76
13	0,11643	190021	22124,14
14	0,1158	190021	22004,43
15	0,11517	190021	21884,72
16	0,11361	190021	21588,28
17	0,11223	190021	21326,06
18	0,10994	190021	20890,91
19	0,10805	190021	20531,77
20	0,11362	190021	21590,19
21	0,10671	190021	22171,65
22	0,11059	190021	21979,73
23	0,10849	190021	21345,06
TOTAL DÍA			517.799,62
TOTAL CUATRIMESTRE			41.423.969,93

Tabla 12. Ingresos para el cuatrimestre de primavera de una central térmica convencional.

En esta tabla, podemos ver cómo hemos obtenido los ingresos en el mes de primavera, hemos multiplicado la potencia nominal de nuestra planta por el precio de la electricidad, y lo hemos sumado, obteniendo los ingresos en un día típico de primavera. Para obtener los ingresos de toda la primavera, hemos dividido trescientos sesenta y cinco días entre las cuatro estaciones del año, y hemos supuesto que la central trabaja el noventa por ciento del tiempo, obteniendo un tiempo medio de operación por cuatrimestre de ochenta días.

El mismo procedimiento, se ha seguido con los otros tres cuatrimestres, los cálculos de estos se pueden observar en el Anexo 2.

En la Tabla 13, podemos observar los ingresos que obtendríamos durante un año, con una central térmica convencional operando a carga total durante todo su uso. A estos beneficios habrá que quitarle los costes que lleva el uso de nuestra planta, además de la inversión inicial realizada.

Ingeniería Mecánica	Trabajo Fin de Grado
---------------------	----------------------

	PRIMAVERA	VERANO	OTOÑO	INVIERNO	TOTAL
INGRESOS (euros)	41.423.970	37.828.012	44.041.395	45.584.974	168.878.351

Tabla 13. Ingresos anuales central térmica convencional.

A partir de [1] obtenemos información relacionada con los costes de construir una central térmica con almacenamiento de energía, además de la inversión inicial que hay que realizar. En este artículo, separan la inversión en tres apartados:

- Potencia, que hace referencia a todo el capital necesario para construir todas las instalaciones necesarias del ciclo de vapor (turbinas, tuberías, bombas...), capaz de funcionar a la potencia máxima.
- Combustión, que hace referencia a todas las instalaciones necesarias para crear la caldera de combustión, capaz de generar la potencia nominal de nuestra planta.
- Almacenamiento, que consta de todo el equipo necesario para conseguir la potencia adicional que se consigue con la circulación de sólidos. Es decir, silos, intercambiadores de calor...

Hay que considerar una serie de costes adicionales:

- Costes fijos.
- Costes variables por cada kWh.
- Coste del fuel.

En la Tabla 14, podemos observar los precios por kWh para construir nuestra planta.

COSTES					
Coste Potencia (€/kW)	Coste Combustión (€/kW)	Coste Almacenamiento (€/kW)	Costes Fijos (€/kW)	Costes Variables (€/kWh)	Coste fuel (€/GJ)
462,5	694,6	195	44,65	0,00625	2,7

Tabla 14. Costes para construir una central en función de los kW.

A partir de estos datos, ya somos capaces de calcular la inversión que habrá que realizar. Para calcular los costes variables, y el coste debido al fuel, es necesario saber cuánto tiempo va a estar operando nuestra central térmica. Nosotros hemos calculado los costes para un año. En el caso de una central térmica sin almacenamiento de energía, el coste de almacenamiento no habrá que tenerlo en cuenta, ya que no disponemos de silos, como en el caso de la central térmica con almacenamiento de energía.

Para calcular el coste de potencia, será necesario multiplicar el coste unitario por la potencia nominal de nuestra planta. En cuanto a los costes de combustión, será necesario multiplicar este coste por los kW que nuestra planta es capaz de generar en la combustión a carga total.

Los costes fijos se calculan multiplicando el coste unitario por la potencia máxima. En cuanto a los costes variables, es necesario multiplicar el coste unitario por cada kWh por

los kWh de cada momento, y calcular el coste por día, para posteriormente calcular el coste anual. Lo mismo habrá que hacer con el coste del fuel, teniendo en cuenta que en este caso nos dan el precio en €/GJ, y, por tanto, será necesario obtener la energía en estas unidades.

Aplicando lo anterior, obtenemos la Tabla 15. Esta nos da información sobre la inversión inicial que habrá que realizar.

INVERSIÓN POTENCIA (€)	INVERSIÓN COMBUSTIÓN (€)	INVERSIÓN TOTAL (€)
87.884.712	131.996.730	219.881.443

Tabla 15. Inversión inicial central térmica convencional

En la Tabla 16, podemos observar los costes que tendrá nuestra planta a lo largo de un año.

Costes			
Costes variables (€)	Costes fijos (€)	Coste fuel (€)	Costes totales (€)
9.121.008	8.483.080	14.072.412	31.676.500

Tabla 16. Costes operativos central térmica convencional.

Para saber en cuantos años podíamos amortizar nuestra inversión, o en cuantos años íbamos a empezar obtener beneficio, hemos calculado el TIR. Según la expresión 33.

$$I = \sum_{i=1}^n \frac{Q_n}{(1+r)^n} \quad (33)$$

Siendo en esta fórmula:

- I = la inversión realizada.
- Q_n = los beneficios que obtenemos por año.
- r = precio del dinero. En nuestro caso, lo hemos obtenido a través del EURIBOR.
 $r=-0,00132$
- n =número de años en los que se amortiza la inversión.

En nuestro caso, conocíamos todos los datos salvo los años de amortización. Iterando, hemos hallado que el tiempo de amortización será de dos años aproximadamente, lo cual significa que, a partir de este año empezaremos a ganar dinero.

4.2.2 Central térmica con almacenamiento de energía.

Vamos a seguir el mismo procedimiento que con la central térmica sin almacenamiento de energía. Explicaremos cómo calcular los beneficios para una época del año, haciendo lo mismo para las otras tres estaciones del año. Pudiéndose consultar en el anexo 2.

Las centrales térmicas con almacenamiento de energía intentan aprovecharse de esta variabilidad en el precio de la electricidad. En momentos de baja demanda que es cuando más barata está la electricidad, en vez de venderla toda, nos dedicamos a almacenar energía. Por contrario, en momentos de alta demanda tenemos suficiente energía para satisfacer esta, y además es cuando más cara está la electricidad, y, por tanto, más dinero podemos ganar.

Vamos a explicar con detalle el cálculo económico para un día típico de primavera, pudiendo ver los resultados obtenidos para el resto de estaciones en el Anexo 2. Lo primero que tenemos que saber es el precio de la electricidad, que va a ser el mismo que en el caso de la central térmica convencional. En la Fig. 21. y la Tabla 11, se pueden ver estos valores.

Ingeniería Mecánica	Trabajo Fin de Grado
---------------------	----------------------

En la Tabla 17, podemos observar los ingresos obtenidos para un día típico de primavera.

PRIMAVERA			
Hora	Precio ($\frac{\text{euros}}{\text{kWh}}$)	Demanda eléctrica (kWh)	Ingresos (€)
0	0,11289	163566,35	18465,00
1	0,10808	154193,72	16665,26
2	0,10728	148834,03	15966,91
3	0,10746	146830,98	15778,46
4	0,10743	143829,82	15451,64
5	0,10836	144390,40	15646,14
6	0,11682	154467,17	18044,85
7	0,11758	168509,02	19813,29
8	0,11859	189667,50	22492,67
9	0,11864	202950,52	24078,05
10	0,11831	209752,68	24815,84
11	0,11702	215214,92	25184,45
12	0,11697	217300,00	25417,58
13	0,11643	220280,65	25647,27
14	0,1158	216527,50	25073,88
15	0,11517	210156,02	24203,67
16	0,11361	209041,70	23749,23
17	0,11223	208645,19	23416,25
18	0,10994	208091,45	22877,57
19	0,10805	203032,55	21937,67
20	0,11362	204249,42	23206,82
21	0,10671	206040,55	24040,81
22	0,11059	209335,66	24213,86
23	0,10849	192354,19	21607,14
TOTAL DÍA			517.794,33
TOTAL CUATRIMESTRE			41.423.546,53

Tabla 17. Ingresos para el cuatrimestre de primavera de una central térmica con almacenamiento de energía.

Esta tabla es similar a la Tabla 11, salvo que en este caso nuestra planta vende la demanda eléctrica que hay, no la potencia nominal que es capaz de generar.

En la Tabla 18, se muestran los resultados obtenidos en un año para una central térmica con almacenamiento de energía.

	PRIMAVERA	VERANO	OTOÑO	INVIERNO	TOTAL
INGRESOS (euros)	41.423.546	38.004.888	44.165.540	45.716.033	169.002.497

Tabla 18. Ingresos anuales central térmica con almacenamiento de energía.

Al igual que en la central térmica convencional, ahora hay que calcular la inversión inicial y los costes de operación. En este caso, la inversión inicial será:

- Potencia, se calculará multiplicando el precio por kW, por la potencia máxima que es capaz de dar nuestra planta con almacenamiento de energía. En este caso, la potencia máxima vale 225 MW, que se produce a la una de la tarde en un día típico de verano.
- Combustión, se calculará multiplicando el precio por kW, por la potencia de combustión de nuestra planta. En este caso la potencia de combustión vale 190 MW.
- En este caso aparece una inversión adicional que en el caso anterior no nos aparecía. La inversión debida al almacenamiento. En [2] definen esta inversión como el producto del precio por kWh, por la energía máxima que es necesario almacenar en los silos. Por tanto, será el precio por kWh de almacenamiento por la diferencia entre la potencia máxima, y la potencia de combustión. En este caso dicha potencia valdrá $P = 35224$ kW.

Finalmente habrá que tener en cuenta también los costes fijos y variables además del coste del fuel. Vamos a hacer los cálculos para un año. Se han tenido en cuenta los valores de la Tabla 14. En la Tabla 19, podemos observar la inversión inicial que hay que realizar.

INVERSIÓN POTENCIA (€)	INVERSIÓN COMBUSTIÓN (€)	INVERSIÓN ALMACENAMIENTO (€)	INVERSIÓN TOTAL (€)
87.884.712	131.996.730	6.856.100	243.028.643

Tabla 19. Inversión central térmica con almacenamiento de energía.

En la Tabla 20, se pueden observar los costes de esta central con almacenamiento de energía.

Costes			
Costes variables (€)	Costes fijos (€)	Coste fuel (€)	Costes totales (€)
9.184.368	8.483.080	14.072.412	31.739.860

Tabla 20. Costes central térmica con almacenamiento de energía.

Para saber en cuantos años podíamos amortizar nuestra inversión, o en cuantos años íbamos a empezar obtener beneficio, hemos calculado el TIR, según la expresión 33. En este caso, conocíamos todos los datos salvo los años de amortización. Iterando, hemos hallado que el tiempo será de dos años aproximadamente, lo cual significa que, a partir de este año empezaremos a ganar dinero.

En la Tabla 21, podemos observar los resultados de ambas plantas.

	Ingresos Anuales (€)	Costes Anuales (€)	Beneficios (€)	Inversión Inicial (€)	Amortización (AÑOS)
Central Térmica sin almacenamiento de energía	168.878.351	31676500	137.201.850	219.881.442	2
Central Térmica con almacenamiento de energía	169.002.497	31739860	137.262.636	243.028.642	2

Tabla 21. Comparativa económica anual central sin almacenamiento de energía con central con almacenamiento de energía.

En base a estos resultados, llegamos a la conclusión de que, en cuanto a términos de rentabilidad, ambas plantas salen rentables, ya que a pesar de que la inversión inicial de una central térmica con almacenamiento de energía es superior, los ingresos que se obtienen son algo superiores que los obtenidos en una central térmica sin almacenamiento de energía.

Por tanto, nuestra central térmica con almacenamiento de energía va a ser más rentable que la convencional a largo plazo, ya que una vez amortizada, nos va a reportar más beneficios que la normal.

5 Conclusiones.

El primer objetivo de mi trabajo era comprobar si una central térmica con almacenamiento de energía era capaz de satisfacer la demanda de una zona y, por tanto, tener una mayor flexibilidad con respecto a las centrales convencionales. El segundo objetivo era comprobar la rentabilidad de este tipo de centrales con respecto a una convencional.

De los cálculos realizados, he observado que las centrales con almacenamiento de energía son capaces de satisfacer la demanda eléctrica diaria. Por tanto, desde el punto de vista técnico su instalación es ventajosa respecto a las centrales sin almacenamiento de energía, que exigen la existencia de otras centrales para cubrir los picos de demanda.

En cuanto al aspecto económico, he comprobado que los resultados son muy parejos. Sí que es cierto que la central térmica con almacenamiento de energía tiene unos ingresos algo superiores que la central térmica convencional. Por tanto, tiene sentido hacer esta inversión, ya que estas centrales se construyen para que operen durante bastantes años.

Hemos conseguido demostrar de forma cuantitativa, que las centrales térmicas con almacenamiento de energía son técnicamente viables, y que además son económicamente rentables. Es cierto que, para hacer un estudio más detallado, habría que tener en cuenta:

- La demanda horaria y precio de la electricidad por hora en el mercado mayorista de todos los días del año, consiguiendo de esta forma unos resultados mucho más precisos.
- Cálculos relacionados con el proceso de combustión de la caldera, además de cálculos relacionados con la capacidad de los silos, y los tiempos de llenado y descarga de estos.

Estos cálculos se dejan para trabajos posteriores, pudiendo conseguir un informe con mucho más detalle.

6 Anexos

6.1 Anexo 1. Ajuste demandas.

En este anexo, aparecen las demandas ajustadas de las cuatro estaciones del año. En la Tabla 22, podemos ver esta demanda para un día típico de primavera.

PRIMAVERA					
HORA	Demandas (MWh)	Demandas media (MW)	Factor de demanda	Potencia nominal (kW)	Demandas ajustadas (MWh)
0	23926	27795,71	0,86	190021	163,57
1	22555	27795,71	0,81	190021	154,19
2	21771	27795,71	0,78	190021	148,83
3	21478	27795,71	0,77	190021	146,83
4	21039	27795,71	0,76	190021	143,83
5	21121	27795,71	0,76	190021	144,39
6	22595	27795,71	0,81	190021	154,47
7	24649	27795,71	0,89	190021	168,51
8	27744	27795,71	0,99	190021	189,67
9	29687	27795,71	1,07	190021	202,95
10	30682	27795,71	1,10	190021	209,75
11	31481	27795,71	1,13	190021	215,21
12	31786	27795,71	1,14	190021	217,30
13	32222	27795,71	1,16	190021	220,28
14	31673	27795,71	1,14	190021	216,53
15	30741	27795,71	1,11	190021	210,16
16	30578	27795,71	1,10	190021	209,04
17	30520	27795,71	1,10	190021	208,64
18	30439	27795,71	1,09	190021	208,09
19	29699	27795,71	1,07	190021	203,03
20	29877	27795,71	1,07	190021	204,25
21	30139	27795,71	1,08	190021	206,04
22	30621	27795,71	1,10	190021	209,33
23	28137	27795,71	1,01	190021	192,35

Tabla 22. Demanda ajustada para un día típico de primavera.

En la Tabla 23, podemos observar estos valores, pero para un día típico de invierno

INVIERNO					
HORA	Demanda (MWh)	Demanda media (MW)	Factor de demanda	Potencia nominal (kW)	Demanda ajustada (MWh)
0	28714	31964	0,90	190021	170,70
1	26844	31964	0,84	190021	159,58
2	25344	31964	0,79	190021	150,67
3	24504	31964	0,77	190021	145,67
4	24275	31964	0,76	190021	144,31
5	24331	31964	0,76	190021	144,64
6	25835	31964	0,81	190021	153,59
7	30013	31964	0,94	190021	178,42
8	34105	31964	1,07	190021	202,75
9	35368	31964	1,11	190021	210,26
10	36500	31964	1,14	190021	216,99
11	36673	31964	1,15	190021	218,02
12	36320	31964	1,14	190021	215,92
13	36188	31964	1,13	190021	215,13
14	35459	31964	1,11	190021	210,80
15	34410	31964	1,08	190021	204,56
16	33298	31964	1,04	190021	197,95
17	33241	31964	1,04	190021	197,61
18	33298	31964	1,04	190021	197,95
19	35045	31964	1,11	190021	208,34
20	35912	31964	1,12	190021	213,49
21	35769	31964	1,12	190021	212,64
22	33908	31964	1,06	190021	201,58
23	31773	31964	0,99	190021	188,89

Tabla 23. Demanda ajustada para un día típico de invierno.

En la Tabla 24, podemos observar la misma tabla ajustada para un día típico de otoño.

OTOÑO					
HORA	Demanda (MWh)	Demanda media (MW)	Factor de demanda	Potencia nominal (kW)	Demanda ajustada (MWh)
0	24722	27751,87	0,89	190021	169,28
1	23747	27751,87	0,85	190021	162,61
2	22908	27751,87	0,82	190021	156,86
3	22185	27751,87	0,80	190021	151,91
4	22113	27751,87	0,81	190021	151,42
5	22095	27751,87	0,79	190021	151,29
6	22992	27751,87	0,83	190021	157,44
7	25878	27751,87	0,93	190021	177,20
8	29208	27751,87	1,05	190021	200,00
9	29755	27751,87	1,07	190021	203,74
10	30499	27751,87	1,10	190021	208,84
11	30859	27751,87	1,11	190021	211,30
12	31014	27751,87	1,12	190021	212,37
13	31410	27751,87	1,13	190021	215,08
14	30617	27751,87	1,10	190021	209,65
15	29666	27751,87	1,07	190021	203,14
16	29272	27751,87	1,05	190021	200,44
17	29451	27751,87	1,06	190021	201,66
18	29234	27751,87	1,05	190021	200,18
19	29087	27751,87	1,05	190021	199,17
20	31249	27751,87	1,13	190021	213,97
21	31807	27751,87	1,15	190021	217,80
22	29715	27751,87	1,07	190021	203,27
23	26562	27751,87	0,96	190021	181,88

Tabla 24. Demanda ajustada para un día típico de otoño.

En la Tabla 25, podemos observar la misma tabla ajustada para un día típico de verano.

VERANO					
HORA	Demanda (MWh)	Demanda media (MW)	Factor de demanda	Potencia nominal (kW)	Demanda ajustada (MWh)
0	28672	32119,08	0,89	190021	169,63
1	27105	32119,08	0,84	190021	160,36
2	25181	32119,08	0,78	190021	148,97
3	24288	32119,08	0,76	190021	143,69
4	23734	32119,08	0,74	190021	140,41
5	23787	32119,08	0,74	190021	140,72
6	24774	32119,08	0,77	190021	146,57
7	26698	32119,08	0,83	190021	157,95
8	29690	32119,08	0,92	190021	175,65
9	32657	32119,08	1,02	190021	193,20
10	34975	32119,08	1,09	190021	206,92
11	36339	32119,08	1,13	190021	214,99
12	37151	32119,08	1,16	190021	219,79
13	38073	32119,08	1,18	190021	225,24
14	37836	32119,08	1,18	190021	223,84
15	37408	32119,08	1,16	190021	221,31
16	36877	32119,08	1,15	190021	218,17
17	37008	32119,08	1,15	190021	218,94
18	36626	32119,08	1,14	190021	216,68
19	35772	32119,08	1,11	190021	211,63
20	35010	32119,08	1,09	190021	207,12
21	34221	32119,08	1,06	190021	202,46
22	34311	32119,08	1,06	190021	202,99
23	32665	32119,08	1,02	190021	193,25

Tabla 25. Demanda ajustada para un día típico de verano.

6.2 Anexo 2. Ingresos por cuatrimestre.

En este anexo, vamos a mostrar el precio de la electricidad, además de los ingresos económicos obtenidos en cada una de las estaciones para una central térmica convencional, y una central térmica con almacenamiento de energía.

En la Fig. 22. podemos observar como varía la electricidad en un día típico de verano. Siendo muy baja a primeras horas de la madrugada, y aumentando conforme pasa el día.

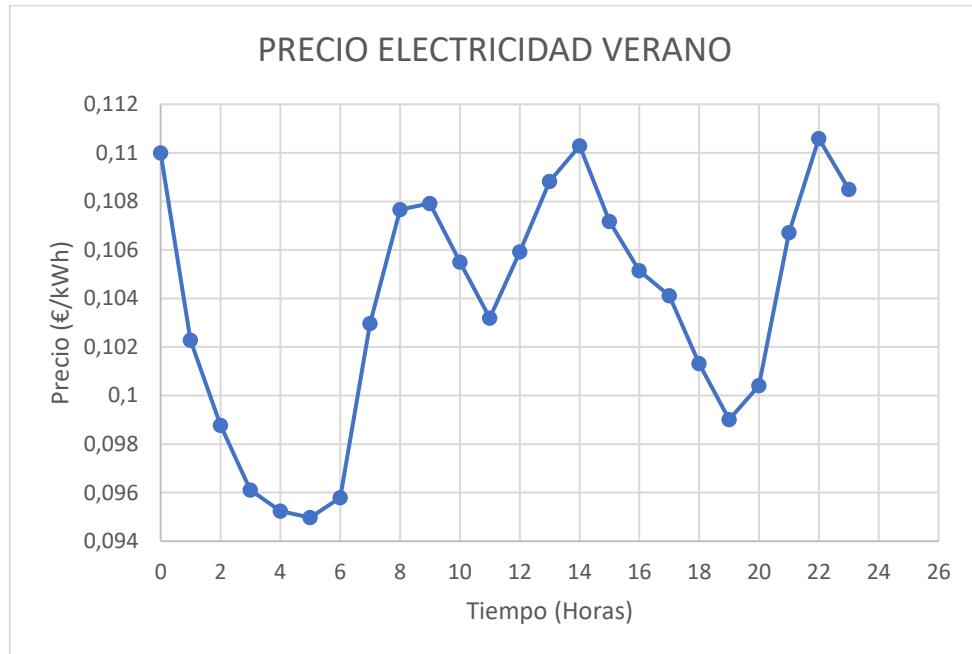


Fig. 22. Precio electricidad en función del tiempo de un día típico de verano.

En la Tabla 26, podemos observar los ingresos obtenidos en nuestra central térmica sin almacenamiento de energía para un día de verano.

VERANO			
Hora	Precio ($\frac{\text{euros}}{\text{KWh}}$)	Demanda (kWh)	Ingresos (€)
0	0,11	190021	20902,31
1	0,10228	190021	19435,35
2	0,09877	190021	18768,37
3	0,09611	190021	18262,92
4	0,09524	190021	18097,60
5	0,09497	190021	18046,29
6	0,09579	190021	18202,11
7	0,10297	190021	19566,46
8	0,10767	190021	20459,56
9	0,10792	190021	20507,06
10	0,1055	190021	20047,21
11	0,10319	190021	19608,27
12	0,10592	190021	20127,02
13	0,10883	190021	20679,98
14	0,11029	190021	20957,42
15	0,10717	190021	20364,55
16	0,10515	190021	19980,71
17	0,10411	190021	19783,09
18	0,10132	190021	19252,93
19	0,09901	190021	18813,98
20	0,10041	190021	19080,01
21	0,10671	190021	20277,14
22	0,11059	190021	21014,42
23	0,10849	190021	20615,38
TOTAL DÍA			472850,16
TOTAL CUATRIMESTRE			37828012,53

Tabla 26. Ingresos económicos del cuatrimestre de verano para una central térmica sin almacenamiento de energía.

En la tabla 27, podemos observar los ingresos obtenidos en un día típico de verano, pero para una central con almacenamiento de energía.

VERANO			
Hora	Precio ($\frac{\text{euros}}{\text{kWh}}$)	Demanda (kWh)	Ingresos (€)
0	0,11	169627,57	18659,03
1	0,10228	160356,98	16401,31
2	0,09877	148974,32	14714,19
3	0,09611	143691,21	13810,16
4	0,09524	140413,67	13372,99
5	0,09497	140727,23	13364,86
6	0,09579	146566,45	14039,60
7	0,10297	157949,11	16264,02
8	0,10767	175650,20	18912,26
9	0,10792	193203,39	20850,51
10	0,1055	206917,00	21829,74
11	0,10319	214986,62	22184,47
12	0,10592	219790,52	23280,21
13	0,10883	225245,21	24513,43
14	0,11029	223843,08	24687,65
15	0,10717	221310,97	23717,90
16	0,10515	218169,50	22940,52
17	0,10411	218944,52	22794,31
18	0,10132	216684,55	21954,48
19	0,09901	211632,17	20953,70
20	0,10041	207124,07	20797,33
21	0,10671	202456,23	21604,10
22	0,11059	202988,69	22448,52
23	0,10849	193250,72	20965,77
TOTAL DÍA			475061,10
TOTAL CUATRIMESTRE			38004888,15

Tabla 27. Ingresos económicos del cuatrimestre de verano para una central térmica con almacenamiento de energía.

En la Fig. 23. podemos observar el precio de la electricidad frente al tiempo en un día típico de primavera.

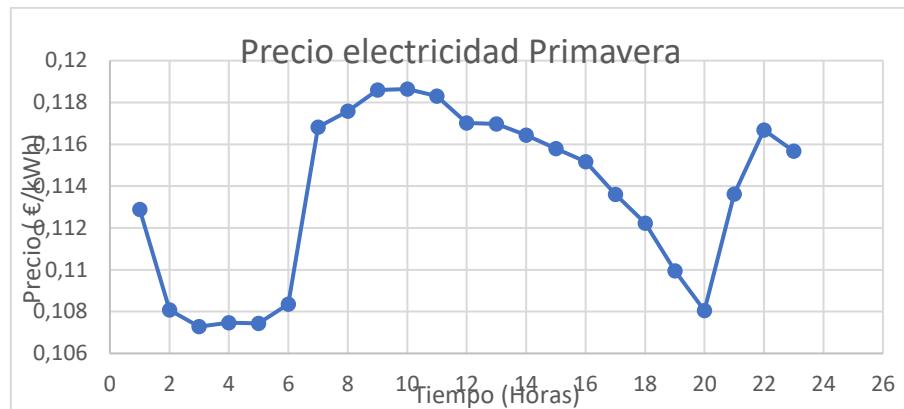


Fig. 23. Precio de la electricidad frente al tiempo en un día típico de primavera.

En la Tabla 28, podemos observar los ingresos obtenidos para una central térmica sin almacenamiento de energía para un día típico de primavera.

PRIMAVERA			
Hora	Precio (euros/kWh)	Potencia Nominal (kWh)	Ingresos (€)
0	0,11289	190021	21451,47
1	0,10808	190021	20537,50
2	0,10728	190021	20385,45
3	0,10746	190021	20419,66
4	0,10743	190021	20413,96
5	0,10836	190021	20590,67
6	0,11682	190021	22198,25
7	0,11758	190021	22342,67
8	0,11859	190021	22534,59
9	0,11864	190021	22544,09
10	0,11831	190021	22481,38
11	0,11702	190021	22236,26
12	0,11697	190021	22226,76
13	0,11643	190021	22124,14
14	0,1158	190021	22004,43
15	0,11517	190021	21884,71
16	0,11361	190021	21588,28
17	0,11223	190021	21326,05
18	0,10994	190021	20890,91
19	0,10805	190021	20531,77
20	0,11362	190021	21590,19
21	0,11668	190021	22171,65
22	0,11567	190021	21979,73
23	0,11233	190021	21345,06
TOTAL DÍA			517799,62
TOTAL CUATRIMESTRE			41423969,9

Tabla 28. Ingresos obtenidos para el cuatrimestre de primavera en una central térmica sin almacenamiento de energía.

En la Tabla 29, podemos observar los ingresos obtenidos en primavera, para una central térmica con almacenamiento de energía.

PRIMAVERA			
Hora	Precio ($\frac{\text{euros}}{\text{kWh}}$)	Demanda (kWh)	Ingresos (€)
0	0,11289	163566,34	18465,00
1	0,10808	154193,72	16665,26
2	0,10728	148834,03	15966,91
3	0,10746	146830,98	15778,46
4	0,10743	143829,82	15451,64
5	0,10836	144390,40	15646,14
6	0,11682	154467,17	18044,85
7	0,11758	168509,02	19813,29
8	0,11859	189667,50	22492,67
9	0,11864	202950,52	24078,05
10	0,11831	209752,68	24815,84
11	0,11702	215214,92	25184,45
12	0,11697	217300,00	25417,58
13	0,11643	220280,65	25647,27
14	0,1158	216527,50	25073,88
15	0,11517	210156,02	24203,67
16	0,11361	209041,70	23749,23
17	0,11223	208645,19	23416,25
18	0,10994	208091,45	22877,57
19	0,10805	203032,55	21937,67
20	0,11362	204249,42	23206,82
21	0,11668	206040,54	24040,81
22	0,11567	209335,66	24213,86
23	0,11233	192354,19	21607,15
TOTAL DÍA			517794,33
TOTAL CUATRIMESTRE			41423546,53

Tabla 29. Ingresos obtenidos para el cuatrimestre de primavera en una central térmica con almacenamiento de energía.

En la Fig. 24. podemos observar como varía el precio de la electricidad en función del tiempo, para un día tipo de otoño.

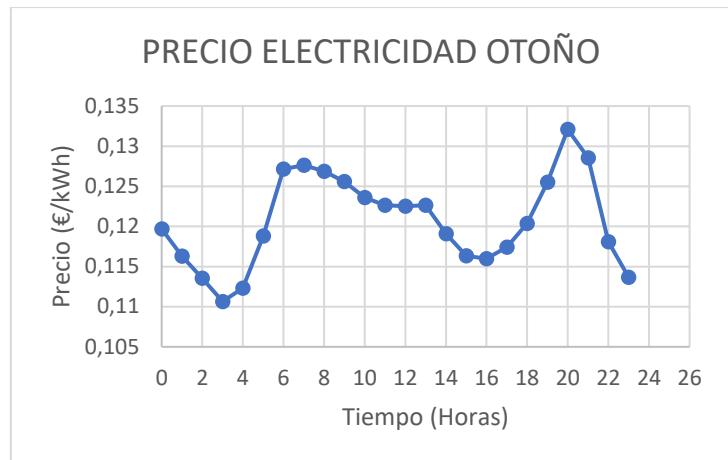


Fig. 24. Precio de la electricidad en función del tiempo en otoño.

En la Tabla 30, podemos observar los ingresos obtenidos en un día típico de otoño.

OTOÑO			
Hora	Precio ($\frac{\text{euros}}{\text{kWh}}$)	Potencia Nominal (kWh)	Ingresos (€)
0	0,11971	190021	22747,41
1	0,1163	190021	22099,44
2	0,11353	190021	21573,08
3	0,11065	190021	21025,82
4	0,11233	190021	21345,06
5	0,11881	190021	22576,39
6	0,12715	190021	24161,17
7	0,12763	190021	24252,38
8	0,12687	190021	24107,96
9	0,12561	190021	23868,54
10	0,12361	190021	23488,49
11	0,12266	190021	23307,97
12	0,12251	190021	23279,47
13	0,12265	190021	23306,07
14	0,1191	190021	22631,50
15	0,11633	190021	22105,14
16	0,11597	190021	22036,73
17	0,1174	190021	22308,46
18	0,12038	190021	22874,73
19	0,12552	190021	23851,43
20	0,13209	190021	25099,87
21	0,12854	190021	24425,30
22	0,11811	190021	22443,38
23	0,11368	190021	21601,59
TOTAL DÍA			550517,44
TOTAL CUATRIMESTRE			44041395,2

Tabla 30. Ingresos económicos en el cuatrimestre de otoño, para una central térmica sin almacenamiento de energía.

En la Tabla 31, podemos observar los ingresos económicos obtenidos en una central con almacenamiento de energía.

OTOÑO			
Hora	Precio ($\frac{\text{euros}}{\text{KWh}}$)	Demanda (kWh)	Ingresos (€)
0	0,11971	163566,35	18465,00
1	0,1163	154193,72	16665,26
2	0,11353	148834,03	15966,91
3	0,11065	146830,98	15778,46
4	0,11233	143829,82	15451,64
5	0,11881	144390,40	15646,14
6	0,12715	154467,17	18044,85
7	0,12763	168509,02	19813,29
8	0,12687	189667,50	22492,67
9	0,12561	202950,52	24078,05
10	0,12361	209752,68	24815,84
11	0,12266	215214,92	25184,45
12	0,12251	217300,00	25417,58
13	0,12265	220280,65	25647,27
14	0,1191	216527,50	25073,88
15	0,11633	210156,02	24203,67
16	0,11597	209041,70	23749,23
17	0,1174	208645,19	23416,25
18	0,12038	208091,45	22877,57
19	0,12552	203032,55	21937,67
20	0,13209	204249,42	23206,82
21	0,12854	206040,55	24040,81
22	0,11811	209335,66	24213,86
23	0,11368	192354,19	21607,14
TOTAL DÍA			517794,33
TOTAL CUATRIMESTRE			41423546,53

Tabla 31. Ingresos económicos obtenidos en el cuatrimestre de otoño para una central térmica con almacenamiento de energía.

Por último, en la Fig. 25. podemos observar la variación del precio de la electricidad en función del tiempo para un día típico de invierno.

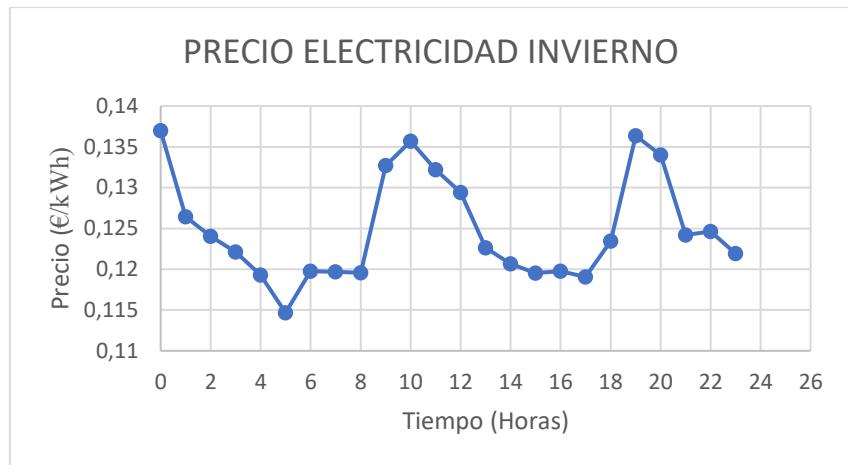


Fig. 25. Precio electricidad en función del tiempo de un día típico de invierno.

En la Tabla 32, se muestran los ingresos obtenidos para un día típico de invierno.

INVIERNO			
Hora	Precio <i>(euros/kWh)</i>	Potencia Nominal (kWh)	Ingresos (€)
0	0,13697	190021	26027,18
1	0,12644	190021	24026,25
2	0,12403	190021	23568,30
3	0,12211	190021	23203,46
4	0,11928	190021	22665,70
5	0,11466	190021	21787,81
6	0,11975	190021	22755,01
7	0,11968	190021	22741,71
8	0,11957	190021	22720,81
9	0,13272	190021	25219,59
10	0,1357	190021	25785,85
11	0,1322	190021	25120,77
12	0,12941	190021	24590,62
13	0,12264	190021	23304,17
14	0,12066	190021	22927,93
15	0,11953	190021	22713,21
16	0,11975	190021	22755,01
17	0,11906	190021	22623,90
18	0,12344	190021	23456,19
19	0,13635	190021	25909,36
20	0,13399	190021	25460,91
21	0,12421	190021	23602,51
22	0,12461	190021	23678,52
23	0,12192	190021	23167,36
TOTAL DÍA			569812,17
TOTAL CUATRIMESTRE			45584973,78

Tabla 32. Ingresos económicos del cuatrimestre de invierno para una central térmica sin almacenamiento de energía.

En la Tabla 33, podemos observar los ingresos obtenidos en invierno para una central con almacenamiento de energía.

INVIERNO			
Hora	Precio ($\frac{\text{euros}}{\text{Kwh}}$)	Demanda (kWh)	Ingresos (€)
0	0,13697	170702,26	23381,09
1	0,12644	159585,27	20177,96
2	0,12403	150667,90	18687,34
3	0,12211	145674,17	17788,27
4	0,11928	144312,79	17213,63
5	0,11466	144645,70	16585,07
6	0,11975	153586,85	18392,0
7	0,11968	178424,70	21353,87
8	0,11957	202751,29	24242,97
9	0,13272	210259,72	27905,67
10	0,1357	216989,36	29445,46
11	0,1322	218017,83	28821,96
12	0,12941	215919,27	27942,1
13	0,12264	215134,54	26384,10
14	0,12066	210800,70	25435,21
15	0,11953	204564,49	24451,59
16	0,11975	197953,74	23704,96
17	0,11906	197614,88	23528,03
18	0,12344	197953,74	24435,41
19	0,13635	208339,51	28407,09
20	0,13399	213493,75	28606,03
21	0,12421	212643,63	26412,46
22	0,12461	201580,14	25118,90
23	0,12192	188887,75	23029,19
TOTAL DÍA			571450,4161
TOTAL CUATRIMESTRE			45716033,28

Tabla 33. Ingresos económicos del cuatrimestre de invierno para una central térmica con almacenamiento de energía.

7 **Bibliografía.**

- [1] Arias, B Criado, Y.A. Sanchez-Biezma, A. Abanades, J.C. Oxy-fired fluidized bed combustors with a flexible power output using circulating solids for thermal energy storage. *Applied Energy* 132 (2014) 127-136
- [2] Arias, B An analysis of the operation of a flexible oxy-fired CFB power plant integrated with a thermal energy storage system. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 45 (2016) 172-180.
- [3] Hausz, W Berkowitz, B.J. Hare, R.C. Conceptual design of thermal energy storage systems for near term electric utility applications: screening of concepts. In: Report DOE/NASA/0012-78/1, vol. 1; 1978.
- [4] Drost MK, Somasundaram S, Brown DR, Antoniak ZI. Thermal energy storage for coal-fired power generation. In: Fossil fuel plant cycling meeting, Washington, DC, USA; 4-6 December 1990.
- [5] Gil A, Medrano M, Mmartorell I, Llázaro A, Dolado P, Zalba B, et al. State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1- concepts, materials and modellization. *Renew Sustain Energy Rev* 2010; 14:31- 55.
- [6] Warerkar S, Tamme R, Schmitz S, Goetsche J, Hoffscmidt B, Reibel M. Airsand heat exchanger for high temperature storage. *J Sol Energy Eng* 2011;133.
- [7] Schwaiger K, Haider M, Holzleithner F, Eisl R. sandTES-A novel thermal energy storage system based on sand. In: 21st International conference on fluidized bed combustion, Naples, Italy: 2012
- [8] Jeter SM, Stephens JH. Systems and methods of thermal energy storage and release. Patent, US2012/0132398A1; 2012.
- [9] www.ree.es/es/ (RED ELÉCTRICA ESPAÑOLA)
- [10] www.endesaclientes.com (ENDESA)
- [11] www.mibel.com (MIBEL)

