



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL MECÁNICO

ALMACENAMIENTO DE AIRE COMPRIMIDO EN FORMACIONES GEOLÓGICAS SUBTERRÁNEAS

Autor: Mario Rigaud Gálvez
Director: Luis Manuel Mochón Castro

Madrid
Agosto de 2014

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN ACCESO ABIERTO (RESTRINGIDO) DE DOCUMENTACIÓN

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. MARIO RIGAUD GÁLVEZ, como **alumno** de la UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS (COMILLAS), **DECLARA**

que es el titular de los derechos de propiedad intelectual, objeto de la presente cesión, en relación con la obra ALMACENAMIENTO DE AIRE COMPRIMIDO EN FORMACIONES GEOLÓGICAS SUBTERRÁNEAS que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual como titular único o cotitular de la obra.

En caso de ser cotitular, el autor (firmante) declara asimismo que cuenta con el consentimiento de los restantes titulares para hacer la presente cesión. En caso de previa cesión a terceros de derechos de explotación de la obra, el autor declara que tiene la oportuna autorización de dichos titulares de derechos a los fines de esta cesión o bien que retiene la facultad de ceder estos derechos en la forma prevista en la presente cesión y así lo acredita.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad y hacer posible su utilización de *forma libre y gratuita (con las limitaciones que más adelante se detallan)* por todos los usuarios del repositorio y del portal e-ciencia, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución, de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra (a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión.

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia, el repositorio institucional podrá:

(a) Transformarla para adaptarla a cualquier tecnología susceptible de incorporarla a internet; realizar adaptaciones para hacer posible la utilización de la obra en formatos electrónicos, así como incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.

(b) Reproducir la en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato. .

(c) Comunicarla y ponerla a disposición del público a través de un archivo abierto institucional, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.¹

(d) Distribuir copias electrónicas de la obra a los usuarios en un soporte digital.²

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra que cede con carácter no exclusivo a la Universidad por medio de su registro en el Repositorio Institucional tiene derecho a:

a) A que la Universidad identifique claramente su nombre como el autor o propietario de los derechos del documento.

b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.

c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada. A tal fin deberá ponerse en contacto con el vicerrector/a de investigación (curiarte@rec.upcomillas.es).

d) Autorizar expresamente a COMILLAS para, en su caso, realizar los trámites necesarios para la obtención del ISBN.

d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

¹ En el supuesto de que el autor opte por el acceso restringido, este apartado quedaría redactado en los siguientes términos:

(c) Comunicarla y ponerla a disposición del público a través de un archivo institucional, accesible de modo restringido, en los términos previstos en el Reglamento del Repositorio Institucional

² En el supuesto de que el autor opte por el acceso restringido, este apartado quedaría eliminado.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.
- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

a) Deberes del repositorio Institucional:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.

b) Derechos que se reserva el Repositorio institucional respecto de las obras en él registradas:

- retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 27 de Agosto de 2014

ACEPTA

Fdo.....



Proyecto realizado por el alumno/a:

Mario Rigaud Gálvez

Fdo.: Fecha://

Autorizada la entrega del proyecto cuya información no es de carácter confidencial

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Luis Manuel Mochón Castro

Fdo.: Fecha://

Vº Bº del Coordinador de Proyectos

Jose Ignacio Linares Hurtado

Fdo.: Fecha://



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL MECÁNICO

ALMACENAMIENTO DE AIRE COMPRIMIDO EN FORMACIONES GEOLÓGICAS SUBTERRÁNEAS

Autor: Mario Rigaud Gálvez
Director: Luis Manuel Mochón Castro

Madrid
Agosto de 2014

ALMACENAMIENTO DE AIRE COMPRIMIDO EN FORMACIONES GEOLÓGICAS SUBTERRÁNEAS

Autor: Rigaud Gálvez, Mario.

Director: Mochón Castro, Luis Manuel.

Entidad colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

RESUMEN DEL PROYECTO

Introducción

La tecnología CAES (Compressed Air Energy Storage) se basa en el almacenamiento de energía a gran escala mediante compresión de aire en un depósito. Su implantación resulta particularmente rentable en Países con una elevada potencia instalada de fuentes de energía renovable, como es el caso de España. De ahí el interés por analizarla termodinámicamente e investigar el estado de desarrollo en el que se encuentra.

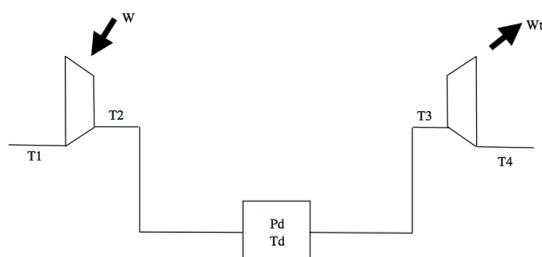
Metodología

Se ha desarrollado el concepto de porcentaje de recuperación de energía de una instalación CAES, que resulta fundamental a la hora de plantearse si el almacenamiento de energía es económicamente rentable. Dependerá del mercado eléctrico y de la diferencia entre el precio de la energía eléctrica a las Horas Punta y a las Horas Valle. El porcentaje de recuperación de energía es la relación entre la energía que el sistema CAES es capaz de devolver del total de energía consumida y almacenada.

Se ha modelado el comportamiento de cada uno de los componentes de la instalación a partir de sus ecuaciones analíticas. Como proceso no es continuo sino que depende del tiempo se ha simulado cada tipo de instalación CAES mediante el programa matemático MATLAB.

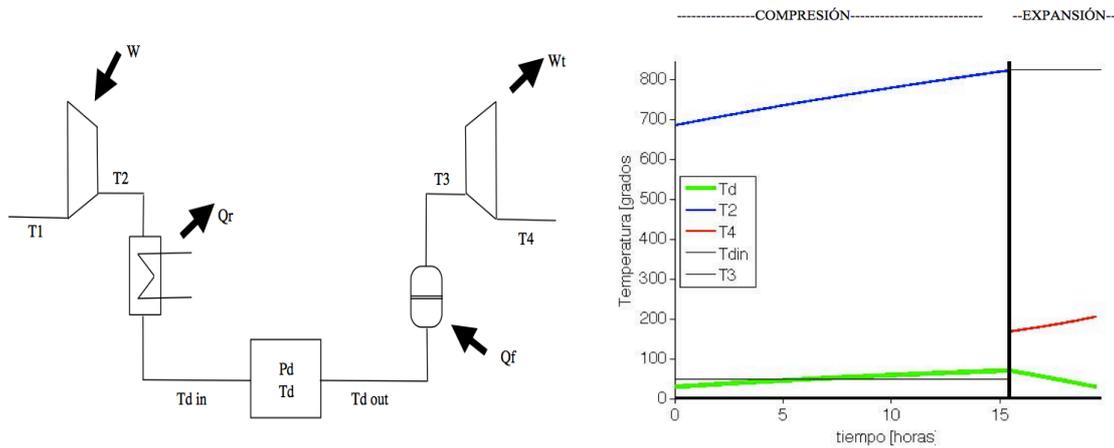
Resultados

La instalación CAES básica tiene el siguiente esquema:



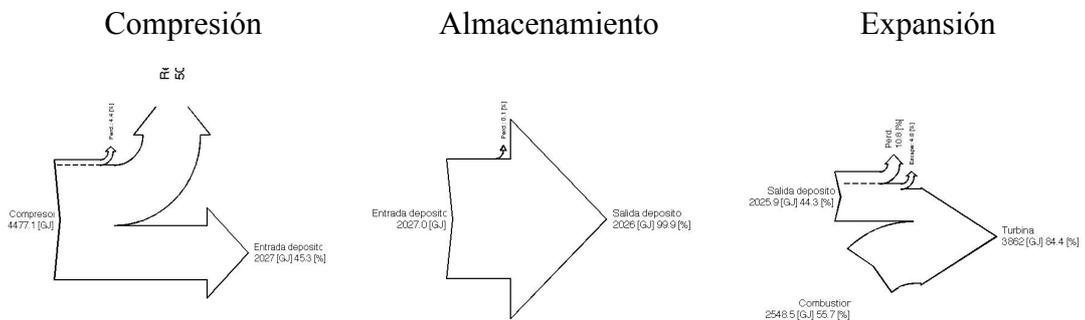
Es la primera instalación simulada con MATLAB y resulta técnicamente inviable por dos motivos: El primero son las altas temperaturas que se alcanzan en el depósito de aire y el segundo es la temperatura inadecuada de entrada a la fase de turbinado. El depósito de aire es una cavidad geológica natural de gran tamaño y profundidad y el aire debe ser almacenado a una temperatura no muy superior a la temperatura ambiental.

Para solucionar estos problemas se añade un refrigerador de aire y una cámara de combustión dando lugar a la instalación CAES convencional, su esquema así como la evolución de las temperaturas con el tiempo a lo largo de un ciclo completo son:



De esta forma el aire entra en el depósito a una temperatura controlada ($T_{din} = 50^{\circ}\text{C}$) y llega a la entrada de la turbina a la temperatura óptima de trabajo ($T_3 = 825^{\circ}\text{C}$).

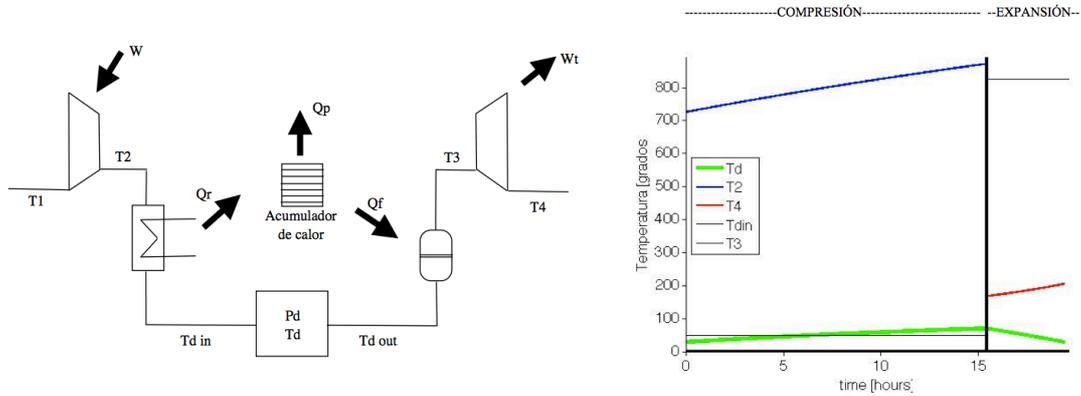
Éste es el tipo de instalación de las dos únicas centrales CAES operativas en el mundo. Su principal limitación es su bajo porcentaje de recuperación de energía (**38%**) debido al hecho de que prácticamente la mitad de la energía útil absorbida por el compresor W_c se pierde por refrigeración Q_r como se puede apreciar en el diagrama de Sankey de la expansión:



También se aprecia que se hay una entrada más de exergía además del trabajo del compresor, se trata de la exergía asociada al calor en la combustión. Esta energía no

será almacenada y su único objetivo es controlar la temperatura de entrada del aire en la fase de turbinado.

El siguiente paso tecnológico es la instalación CAES adiabática. Su esquema y la evolución de las temperaturas a lo largo de un ciclo son:



Se sigue manteniendo controladas las temperaturas de entrada en el depósito ($T_{din} = 50^{\circ}\text{C}$) y de entrada a la fase de turbinado ($T_3 = 825^{\circ}\text{C}$) por lo que no habrá ningún problema técnico en cuanto a temperaturas se refiere. El desafío tecnológico vendrá por la necesidad de un acumulador que almacene hasta 1000MWh de energía térmica en periodos de 4 a 12 horas, y por el diseño de un compresor de alta relación de presión sin inter-refrigeraciones. Los diseños más favorables hasta el momento consisten en un compresor axial de baja presión en serie con un compresor radial de alta presión [7] y para el acumulador se opta por cilindros de hormigón precomprimido.

El hecho de que la refrigeración no suponga una pérdida total de exergía hace que el porcentaje de recuperación de energía de la instalación aumente considerablemente (62%). El rendimiento del acumulador térmico será un punto clave para la mejora del porcentaje de recuperación de energía.

En función de la relación del precio de la energía eléctrica en las Horas Valle y las Horas Punta en un mercado eléctrico tendremos los porcentajes de recuperación de energía mínimos necesarios para considerar económicamente viable el almacenamiento de energía mediante sistemas CAES. En el mercado eléctrico español:

Año	%mínimo	CAES convencional	CAES adiabático
2008	64.47%	-	-
2009	56.53%	-	+
2010	47.39%	-	+
2011	66.2%	-	-
2012	58.45%	-	+

Conclusiones

Los sistemas CAES convencionales no resultan rentables por sí mismos considerando la variación en el precio de la energía eléctrica a lo largo de un día en España. Sin embargo se puede optar por combinarlos con parques eólicos, de manera que el parque cargue el sistema CAES en momentos en los que la producción de energía exceda a la demanda.

El sistema CAES adiabático tiene un elevado porcentaje de recuperación de energía, y esto unido al hecho que su consumo de combustible es muy bajo le dan una ventaja decisiva sobre el CAES convencional. . Su único punto negativo es que aún no hay ninguna central a escala operativa en el mundo. Además tanto el acumulador de energía térmica como el compresor de altas presiones, que debe ser sin inter-refrigeraciones, se encuentran en fase de testeo. Algunos proyectos en marcha actualmente serán decisivos para comprobar el comportamiento de estos dos elementos en la práctica.

COMPRESSED AIR STORAGE IN UNDERGROUND GEOLOGICAL FORMATION

Introduction

CAES technology (Compressed Air Energy Storage) is based on the storage of energy by compressed air in a deposit. Its implantation is very profitable in countries with high installed capacity of renewable energy sources as in Spain. Hence the interest in the thermodynamic analysis and the investigation of its developmental stage.

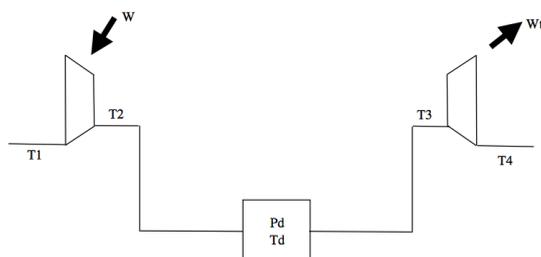
Methodology

The concept of percentage recovery of energy from a CAES facility has been developed. This is essential when considering whether the energy storage is economically profitable. The profitability will depend on the electricity market as well as on the difference between the price of electricity at rush hour and at low electricity hours. The energy recovery percentage is the ratio between the energy the CAES system is able to return of the total consumed energy and the energy stored.

The behavior of each of the system components has been studied attending its analytical equations. As this process depends on time, each type of CAES facility has been simulated using the mathematical program MATLAB.

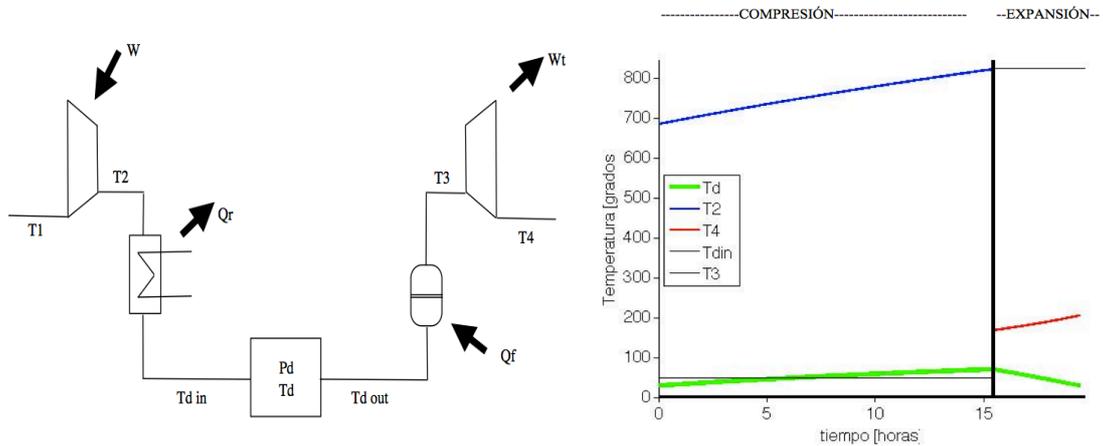
Results

The basic CAES facility has the following scheme:



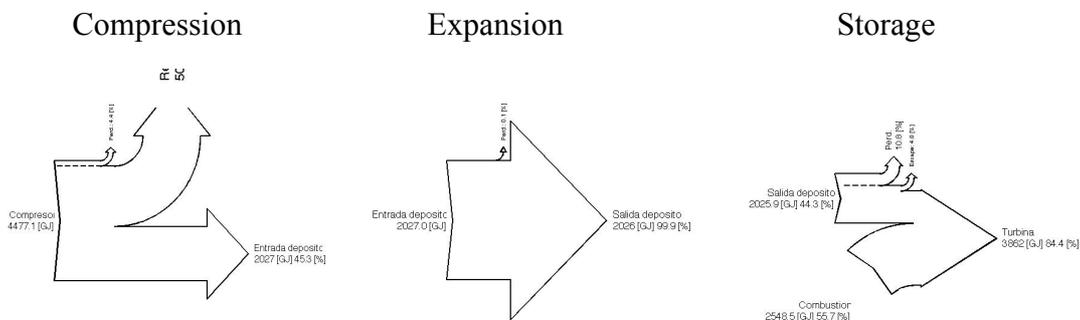
This is the first simulated system with MATLAB and is technically not feasible for two reasons; The high temperatures reached in the air reservoir and an inadequate inlet temperature in the turbines. The air reservoir is a natural geological cavity big in size and depth where air must be stored in a temperature not drastically higher than room temperature.

To solve these problems, an air cooler and a combustion chamber has been added to the scheme. This results in the conventional CAES facility. Its scheme, as well as the temperature evolution with time over a complete cycle are the following.



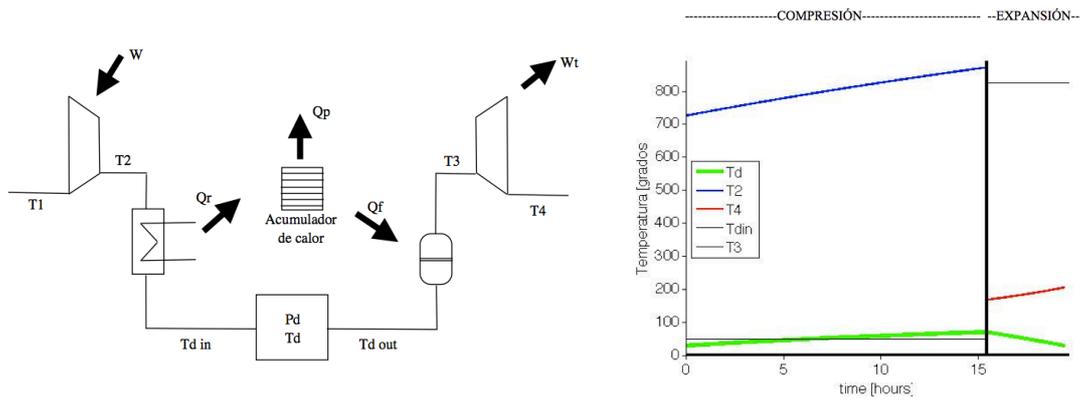
This way, air enters the tank at a controlled temperature ($T_{din}=50^{\circ}C$) and reaches the turbine inlet at the optimal temperature ($T_3=825^{\circ}C$). This is the installation used in the only two CAES plants operating in the world.

Its main limitation is the low percentage of energy recovery (38%) due to the fact that almost half of the useful energy absorbed by the compressor W_c is lost through cooling (Q_r) as shown in the Sankey diagram of the expansion.



It is also worth noting the entrance of exergy that takes place. This is exergy associated with heat in the combustion. This energy can not be stored and its sole purpose is to control the inlet temperature of the air at the turbine stage.

The next technological step is the adiabatic CAES facility. The scheme and temperature evolution during the cycle are the following shown:



Controlled temperatures in the tank inlet ($T_{din} = 50^{\circ}\text{C}$) and in the entrance to the turbine ($T_3 = 825^{\circ}\text{C}$) are maintained. This means there will be no technical problem as far as temperatures are concerned. The technological challenge comes from the need for an accumulator to store 1000 MWh of thermal energy in periods of 4 to 12 hours. The design of a compressor with a high pressure ratio without intercooling is also a challenge.

The most favorable designs to date consist of a low pressure axial compressor in series with a high pressure radial compressor. The accumulator chosen is a pre-stressed concrete cylinder.

The fact that the cooling does not involve a total loss of exergy makes the percentage of energy recovery increase significantly (62%). The performance of the thermal store will be key to improve the energy recovery percentage. Depending on the ratio of the price of electricity in the low and rush electricity hours we will have the minimum energy recovery percentages needed to consider economically viable energy storage systems CAES. For the Spanish electricity market the minimum percentages are shown in the following table.

Año	%mínimo	CAES convencional	CAES adiabático
2008	64.47%	-	-
2009	56.53%	-	+
2010	47.39%	-	+
2011	66.2%	-	-
2012	58.45%	-	+

Conclusion

Conventional CAES systems are not profitable for themselves considering the variation in the prices of electrical energy throughout a day in Spain. However, if you choose to combine them with wind farms, the CAES facility will be used in times when energy production exceeds demand.

The adiabatic CAES system has a high percentage of energy recovery. This is coupled with the fact that its fuel consumption is very low gives it a decisive advantage over conventional CAES. Its only negative is that there is still no facility operating for the whole world. Furthermore, both the thermal energy accumulator and the high pressure compressor, which must not have intercoolings are in testing phase. Some projects currently underway will be crucial to test the behaviour of these two elements in practice.



Índice de la memoria

Parte I Memoria	3
Capítulo 1 Introducción	4
1.1 Estudio de las tecnologías existentes.....	5
1.2 Motivación del proyecto.....	7
1.3 Objetivos	9
1.4 Recursos / herramientas empleadas	10
Capítulo 2 Teoría CAES.....	11
2.1 Componentes principales.....	12
2.2 Criterios geológicos	14
2.3 Criterios de localización.....	16
Capítulo 3 Modelado general CAES.....	17
3.1 Compresión	18
3.2 Expansión	18
3.3 Almacenamiento de aire	19
3.3.1 Etapa de expansión; llenado del depósito.....	21
3.3.2 Etapa de compresión; vaciado del depósito	21
3.4 Refrigeración	22
3.5 Cámara de combustión	23
3.6 Eficiencia	23
3.6.1 Rendimiento térmico	24
3.6.2 Eficiencia exergética	25
3.6.3 Porcentaje de recuperación de energía	26
3.7 Características del modelo.....	29



Capítulo 4	Análisis termodinámico	31
4.1	Instalación CAES básica.....	31
4.1.1	Variables de entrada	31
4.1.2	Duración etapas	33
4.1.3	Potencia del compresor y la turbina	33
4.1.4	Capacidad de la planta.....	34
4.1.5	Temperaturas y presiones	34
4.1.6	Análisis exergético	36
4.1.6.1	Diagrama de Sankey etapa de compresión	37
4.1.6.2	Diagrama de Sankey etapa de almacenamiento	38
4.1.6.3	Diagrama de Sankey de la etapa de expansión.....	39
4.1.7	Porcentaje de recuperación de energía	39
4.2	Instalación CAES convencional.....	40
4.2.1	Variables de entrada	42
4.2.2	Duración etapas	42
4.2.3	Potencia del compresor y de la turbina	43
4.2.4	Capacidad energética.....	44
4.2.5	Temperaturas y presiones	45
4.2.6	Análisis exergético	46
4.2.6.1	Diagrama de Sankey etapa de compresión	48
4.2.6.2	Diagrama de Sankey etapa de almacenamiento	49
4.2.6.3	Diagrama de Sankey etapa de expansión	50
4.2.7	Rendimiento CAES	51
4.3	Instalación CAES adiabática.....	52
	- Compresor:	53
	- Acumulador de energía térmica.....	54
4.3.1	Variables de entrada	56
4.3.2	Duración etapas	57
4.3.3	Potencia del compresor y de la turbina	58
4.3.4	Capacidad energética.....	58
4.3.5	Temperaturas y presiones	58
4.3.6	Análisis exergético	59
4.3.6.1	Diagrama de Sankey etapa de compresión	61
4.3.6.2	Diagrama de Sankey etapa de almacenamiento	62
4.3.6.3	Diagrama de Sankey etapa de expansión	63
4.3.7	Porcentaje de recuperación de energía	63



<i>Capítulo 5 Viabilidad económica.....</i>	<i>65</i>
<i>Capítulo 6 Conclusiones</i>	<i>67</i>
<i>Capítulo 7 Futuros desarrollos</i>	<i>69</i>
<i>Bibliografía</i>	<i>70</i>
<i>Parte II Código fuente.....</i>	<i>71</i>
<i>Capítulo 1 Sistema CAES básico</i>	<i>72</i>
<i>Capítulo 2 Sistema CAES convencional.....</i>	<i>79</i>
<i>Capítulo 3 Sistema CAES Adiabático.....</i>	<i>88</i>



Índice de figuras

Figura 1. Instalación CAES simple [6]	6
Figura 2. Huntorf CAES [6]	6
Figura 3. Alabama CAES [6]	7
Figura 4. Sistemas de almacenamiento de energía [5]	8
Figura 5. Ciclo Brayton : (1)Aire de entrada (2)Compresor (3)Cámara de combustión (4)Consumo de combustible (5)Turbina (6)Humos de escape (7)Generador (8)Energía eléctrica.....	11
Figura 6. Sistema CAES: (1)Aire de entrada (2)Compresor (3)Depósito (4)Aire comprimido (5)Cámara de combustión (6)Consumo de combustible (7)Turbina (8)Gases de escape (9)Motor/Generador (10)Embrague (11)Embrague (12)Energía eléctrica	12
Figura 7. Compresión a 3 etapas con inter-refrigeradores.	12
Figura 8. Esquema de una instalación CAES básica.....	31
Figura 9. Características de diseño sistema CAES básico	32
Figura 10. Potencias compresión expansión CAES básico.....	34
Figura 11. Temperaturas CAES básico	35
Figura 12. Diagrama de Sankey compresión CAES básico	37
Figura 13. Diagrama de Sankey almacenamiento CAES básico.....	38
Figura 14. Diagrama Sankey expansión CAES básico	39
Figura 15. Instalación CAES en Huntorf, Alemania.....	40
Figura 16. Esquema instalación CAES convencional.....	41



Figura 17. Potencias expansión compresión CAES convencional.....	44
Figura 18. Temperaturas CAES convencional.....	45
Figura 19. Diagrama de Sankey CAES convencional.....	48
Figura 20. Diagrama de Sankey almacenamiento CAES convencional	49
Figura 21. Diagrama de Sankey expansión CAES convencional	50
Figura 22. Porcentaje de recuperación de energía - Temperatura de entrada depósito	51
Figura 23. Esquema instalación CAES adiabática	55
Figura 24. Potencias expansión compresión CAES adiabático.....	58
Figura 25. Temperaturas CAES adiabático.....	59
Figura 26 Diagrama de Sankey compresión CAES adiabático.....	61
Figura 27. Diagrama de Sankey almacenamiento CAES adiabático	62
Figura 28. Diagrama de Sankey expansión CAES adiabático	63
Figura 29. Porcentaje de recuperación expansión CAES adiabático	63
Figura 30. Porcentaje de recuperación de energía- rendimiento del acumulador .	64



Índice de tablas

Tabla 1. Tiempos de ciclo CAES convencional.....	33
Tabla 2. Temperaturas CAES básico	35
Tabla 3. Exergías CAES básico	36
Tabla 4. Porcentaje de recuperación compresión CAES básico.....	37
Tabla 5. Porcentaje de recuperación almacenamiento CAES básico.....	38
Tabla 6. Porcentaje de recuperación expansión CAES básico.....	39
Tabla 7. Porcentaje de recuperación de energía CAES básico.....	39
Tabla 8. Características Huntorf Power Plant	42
Tabla 9. Tiempos de ciclo CAES convencional.....	43
Tabla 10. Comparación potencias medias Huntorf-modelo.....	44
Tabla 11. Temperaturas CAES convencional	46
Tabla 12. Exergías CAES convencional	47
Tabla 13. Porcentaje de recuperación compresión CAES convencional	48
Tabla 14. Porcentaje de recuperación almacenamiento CAES convencional.....	49
Tabla 15. Porcentaje de recuperación expansión CAES convencional.....	51
Tabla 16. Porcentaje de recuperación de energía total CAES convencional	51
Tabla 17. Características central CAES adiabática.....	57
Tabla 18. Tiempos de ciclo CAES adiabático.....	57
Tabla 19. Exergías CAES adiabático	60



Tabla 20. Porcentaje de recuperación compresión CAES adiabático	61
Tabla 21. Porcentaje de recuperación almacenamiento CAES adiabático.....	62
Tabla 22. Porcentaje de recuperación de energía CAES adiabático	63
Tabla 23. Precio energía eléctrica	65
Tabla 24. Precio energía eléctrica	66



Parte I MEMORIA



Capítulo 1 INTRODUCCIÓN

Este proyecto se ha centrado en la investigación de la tecnología CAES (Compressed air energy storage). Se trata de una tecnología para almacenar energía a gran escala mediante aire comprimido en estructuras geológicas subterráneas. A pesar de que tan sólo hay dos centrales CAES en el mundo y llevan operativas más de 30 años, es en los últimos años cuando ha aumentado el interés por este sistema de almacenamiento energético. La causa principal ha sido el gran desarrollo que las fuentes de energía renovable han tenido y están teniendo, ya que su intermitencia a la hora de generar energía eléctrica hace que un sistema para almacenarla sea muy valioso.

En el Capítulo 2 se explica en qué consiste un sistema CAES de almacenamiento energético, se muestra por qué dispositivos está constituido y qué criterios debemos tener en cuenta a la hora de elegir su localización.

Posteriormente en el Capítulo 3 se desarrollan las ecuaciones termodinámicas para cada componente del sistema CAES. En estas ecuaciones nos basaremos para el modelado con MATLAB. Además se comentan los problemas que nos encontramos a la hora de calcular la eficiencia de estos sistemas y se incorporará un término novedoso; el porcentaje de recuperación de energía eléctrica.

Seguidamente en el Capítulo 4 se utilizarán las ecuaciones del Capítulo 3 para simular una instalación CAES básica. Se obtendrán resultados y se explicarán los problemas técnicos que hacen de este tipo de instalación un proyecto inviable. Se comentará cómo se solucionan estos problemas para dar lugar al llamado CAES convencional. Éste es el punto en el que la tecnología actual se encuentra, con tan sólo dos instalaciones CAES convencionales operativas en el mundo. Sin embargo el bajo porcentaje de recuperación de energía eléctrica de este tipo de instalaciones hacen que no sea una opción demasiado atractiva a la hora de



almacenar energía eléctrica. Las líneas de investigación apuntan a un nuevo tipo de instalación denominada CAES adiabático, se explicará en qué consiste, qué desafíos tecnológicos plantea y se simulará con MATLAB. Se obtendrán resultados y se compararán con el sistema CAES convencional.

Finalmente se concluirá sobre el futuro que tiene la tecnología CAES en el balance energético español.

1.1 ESTUDIO DE LAS TECNOLOGÍAS EXISTENTES

La instalación CAES más simple (Figura 1) consiste en un compresor, un depósito y una turbina. Todos los procesos serían adiabáticos, comprimiéndose aire en el depósito cuando se quiere almacenar energía y liberando el aire del depósito cuando se quiere recuperar la energía. Si los procesos fueran totalmente reversibles el sistema sería 100% eficiente, en el sentido de que toda la energía almacenada puede volver a ser recuperada. Lo que ocurre realmente es que debido a las características del depósito (será un depósito natural como se verá posteriormente) el aire debe ser enfriado después de la compresión y antes de su almacenamiento en el depósito. Esta enfriamiento es en definitiva una pérdida de energía en forma de calor que provoca una disminución de la eficiencia de almacenamiento energético incluso aunque consideremos todos los procesos totalmente reversibles.

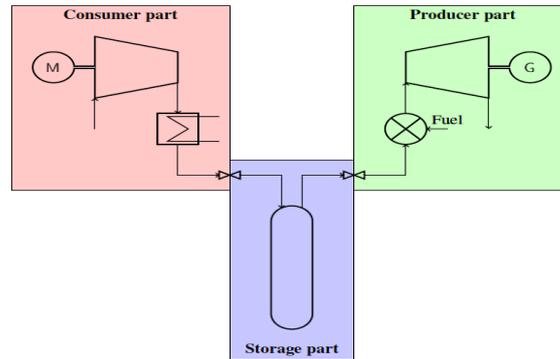


Figura 1. Instalación CAES simple [6]

En la actualidad sólo hay dos centrales CAES operativas en el mundo, una es Huntorf CAES Plant (Figura 2), en Alemania, y la otra es McIntosh Power Plant (Figura 3) en USA. Ambas se basan en la forma CAES más simple con el necesario enfriamiento post-combustión, lo que hace disminuir la eficiencia significativamente. Debido a consideraciones técnicas, la compresión se realiza en varias etapas con inter-refrigeración y la expansión también en varias etapas con recalentamiento intermedio.

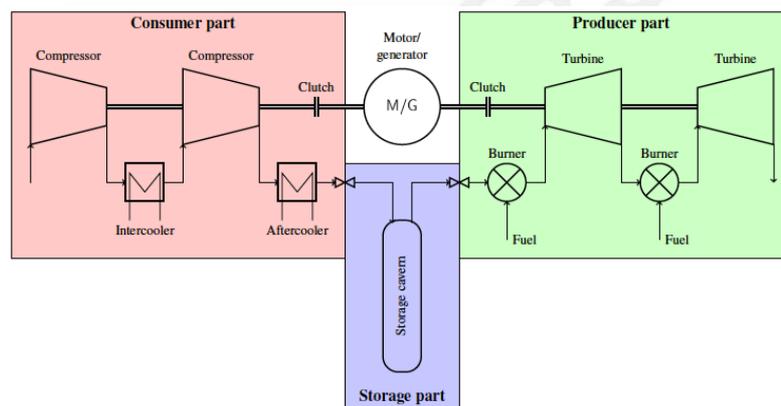


Figura 2. Huntorf CAES [6]

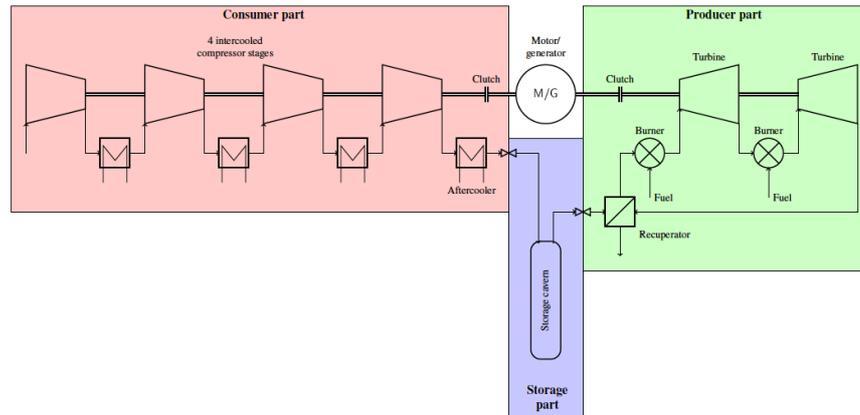


Figura 3. Alabama CAES [6]

1.2 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

En las últimas décadas se ha experimentado un gran crecimiento de fuentes de energía renovable, y la introducción en el sistema eléctrico de estas fuentes de energía hacen necesario desarrollar una manera eficiente de controlar la producción de energía variable para hacerla corresponder con la demanda.

En España en particular hay gran cantidad de parques eólicos, su producción depende del viento por lo que resulta muy difícil coordinarlos con los picos de demanda energética. Por ello la instalación de parques eólicos exige de otras fuentes de producción fiable que actúen en momentos de condiciones meteorológicas poco favorables. Pero otra posible solución sería combinar los parques eólicos con sistemas de almacenamiento de energía, de esta forma no solo se consigue satisfacer la demanda energética sino que evita que los parques eólicos se encuentren parados porque no haya demanda de electricidad cuando las condiciones meteorológicas son favorables.

¿Con qué sistema de almacenamiento de energía podríamos combinar los parques eólicos? El almacenamiento de energía se puede realizar con baterías eléctricas, baterías de flujo, pilas de combustible, volantes de inercia, centrales hidroeléctricas reversibles, almacenamiento magnético mediante superconductores, supercondensadores y aire comprimido entre otros, pero únicamente las centrales hidroeléctricas reversibles y las instalaciones CAES son capaces de almacenar durante horas energía eléctrica a una potencia elevada.

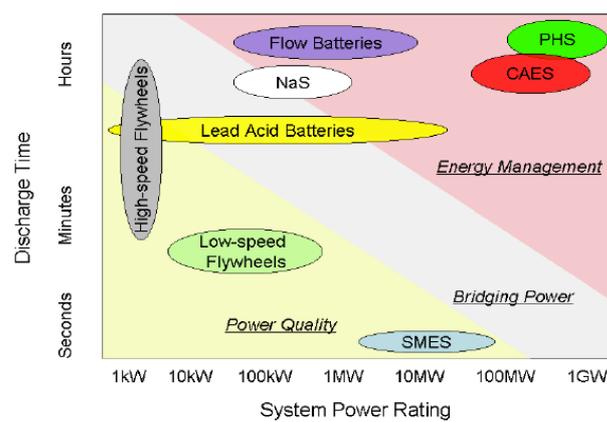


Figura 4. Sistemas de almacenamiento de energía [5]

Tradicionalmente se ha optado por las centrales hidroeléctricas reversibles, sin embargo éstas tienen el inconveniente de que son fuertemente dependientes de formaciones geológicas adecuadas, y esto junto con unas políticas ambientales cada vez más restrictivas hacen que el desarrollo de nuevas centrales hidroeléctricas sea cada vez más difícil. Todo ello la tecnología CAES, con multitud de nuevos proyectos en desarrollo en todo el mundo[5].

Sin lugar a dudas, la tecnología CAES tiene un gran potencial en sistemas energéticos con gran cantidad de fuentes de energía renovable como es el caso de España, por lo que resulta extremadamente interesante analizarla y comprender sus limitaciones para tener una idea general de en qué situaciones puede resultar rentable su implantación.



1.3 OBJETIVOS

En primer lugar se abordarán los fundamentos termodinámicos del sistema CAES más simple, que se utilizará como base para las simulaciones de las instalaciones con MATLAB.

En segundo lugar se pretende desarrollar la definición de porcentaje de energía eléctrica recuperada. En las publicaciones y estudios sobre sistemas CAES se han utilizado distintos conceptos de rendimiento, como puede ser la eficiencia exergética definida en [4] que nos da una idea de cómo de perfecto es el proceso, en el sentido de si se producen pocas o muchas irreversibilidades. Esto resulta muy útil para una central térmica que produce en régimen permanente por ejemplo, sin embargo un sistema CAES que tiene dos entradas de energía diferenciadas (electricidad al compresor y combustible a la cámara de combustión), que la entrada y salida de energía se produce en momentos distintos (a veces está el compresor funcionando y se almacena energía y otras la turbina es la que está en funcionamiento liberándose la energía almacenada) y que además no busca convertir energía térmica en electricidad (las transformaciones energéticas son un medio para conseguir almacenar la energía, no un fin) requiere de otro tipo de definición de rendimiento. Por todo ello lo que buscamos es qué parte de la energía eléctrica que el sistema CAES ha consumido en un momento de baja demanda energética se podrá devolver en un momento de alta demanda energética, siendo éste el auténtico fin de los sistemas CAES. De esta forma se definirá el porcentaje de recuperación de energía eléctrico en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Con este nuevo rendimiento podremos evaluar cómo de efectiva es una instalación CAES a la hora de almacenar energía eléctrica. Se procederá a simular distintos tipos de tecnología CAES y se compararán atendiendo a este rendimiento. De esta manera se pretende el futuro que esta tecnología puede tener en el mercado eléctrico Español.



1.4 RECURSOS / HERRAMIENTAS EMPLEADAS

Se han utilizado fundamentos de termodinámica técnica, en particular ha sido especialmente útil el uso de exergías y diagramas de Sankey a la hora de analizar los distintos tipos de sistemas CAES.

Como el estado de un sistema CAES evoluciona a lo largo del tiempo se ha utilizado el programa matemático MATLAB para simular los distintos tipos de instalaciones CAES.

Capítulo 2 TEORÍA CAES

El sistema CAES o Compressed Air Energy Storage tiene como fin almacenar energía. Esto lo consigue comprimiendo aire en un depósito que generalmente se trata de una estructura geológica subterránea adecuada.

El principio de funcionamiento de un sistema CAES está basado en el ciclo de gas o ciclo Brayton. Como se puede ver en Figura 5 y Figura 6 el sistema CAES desacopla la turbina del compresor de forma que las etapas de expansión y compresión se producen de forma no simultánea. En momentos de baja demanda eléctrica la energía es almacenada en forma de energía potencial elástica mediante la compresión de aire en un depósito, en este momento el compresor será el que esté acoplado al motor. Cuando se necesite la energía almacenada, ésta se obtiene mediante la extracción del aire comprimido del depósito a través de la expansión en una turbina, ahora será la turbina la que se acoplará por medio de embragues al motor, el cual pasará a funcionar como generador.

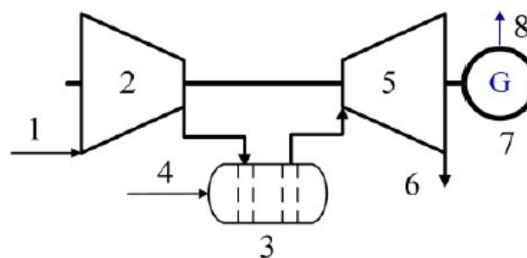


Figura 5. Ciclo Brayton : (1)Aire de entrada (2)Compresor (3)Cámara de combustión
(4)Consumo de combustible (5)Turbina (6)Humos de escape (7)Generador (8)Energía eléctrica

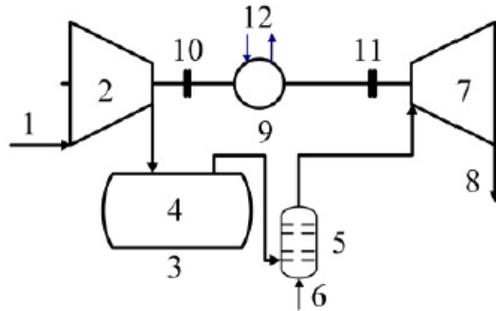


Figura 6. Sistema CAES: (1)Aire de entrada (2)Compresor (3)Depósito (4)Aire comprimido (5)Cámara de combustión (6)Consumo de combustible (7)Turbina (8)Gases de escape (9)Motor/Generador (10)Embrague (11)Embrague (12)Energía eléctrica

2.1 COMPONENTES PRINCIPALES

Las dos instalaciones CAES que se encuentran actualmente operativas en el mundo tienen los siguientes componentes principales [5]:

- Grupo de compresores.

En lugar de realizar la compresión con un único compresor la búsqueda de alternativas para disminuir el trabajo de compresión conduce a aproximar un proceso de compresión a temperatura constante, utilizando dos o más compresores con inter-refrigeradores:

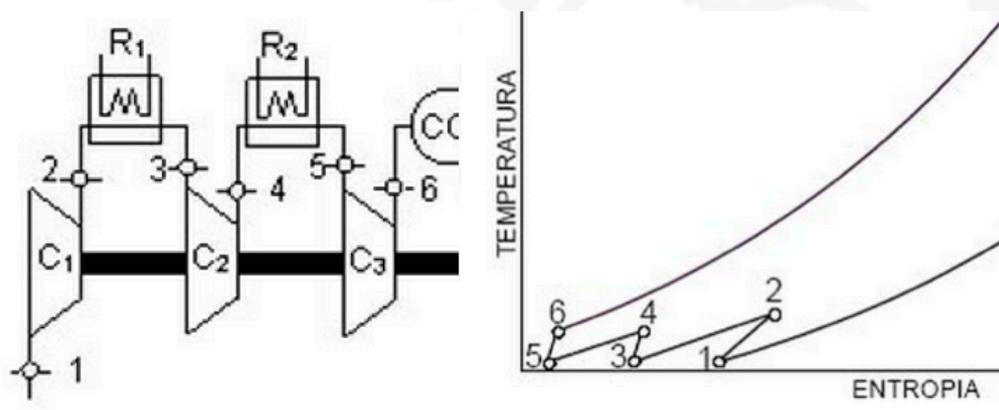


Figura 7. Compresión a 3 etapas con inter-refrigeradores.



Ésta es la configuración de compresión utilizada por un sistema CAES convencional.

- Grupo de turbinas.

La expansión se realiza también en varias etapas distinguiéndose entre turbinas de alta presión y de baja presión. Se busca que la temperatura de entrada a la fase de turbinado sea elevada.

- Un motor-generator.

El acoplamiento y desacoplamiento del motor-generator con las turbinas y los compresores se realizará mediante embragues. No se precisan características especiales con respecto a los motores-generadores disponibles industrialmente.

- Un sistema de control.

Resultará necesario para el manejo de los dos distintos modos de funcionamiento. El sistema puede cambiar del modo de almacenamiento de energético al modo de generación en media hora aproximadamente.

- Cavity geológica natural.

Será donde se almacene el aire comprimido y resultará más o menos adecuada en función de una serie de criterios que se discutirán en 2.2.

- Equipo auxiliar.

Como puede ser la cámara de combustión, el depósito de combustible, intercambiadores de calor, etc. Hay que tener en cuenta que los componentes auxiliares pueden variar de un sistema CAES a otro, por ejemplo el sistema CAES adiabático no dispondrá de cámara de combustión pero necesitará de un dispositivo acumulador de energía térmica que los otros tipos de sistemas CAES no necesitan.



El único elemento de la instalación que no se encuentra en la superficie es el depósito de aire, como no es un elemento artificial no supondrá un aumento elevado en el coste de un proyecto CAES.

2.2 CRITERIOS GEOLÓGICOS

Con el fin de determinar si una determinada cavidad puede resultar viable para el almacenamiento de aire comprimido hay que saber si las siguientes características de la estructura geológica resultan adecuadas:

- Volumen.

El volumen determina la masa de aire máxima que se puede almacenar si la presión de almacenamiento máxima está fijada. En otras palabras, un mayor volumen implicará que el sistema es capaz de almacenar una mayor cantidad de energía y por tanto podrá estar mayor tiempo expandiendo aire para generar electricidad a una potencia dada aumentando su capacidad energética. Huntford CAES Plant tiene un volumen disponible para almacenar aire comprimido de 300,000 m³

- Presión.

La cavidad debe soportar el máximo rango de presiones posible. Cuanto mayor es la presión máxima que soporta mayor será la cantidad de energía que podemos almacenar para un mismo volumen. Por otro lado la cavidad debe tener una presión mínima que debe mantener de forma natural, será de aproximadamente 30 bares y asegurará la estabilidad de la caverna y evitará infiltraciones de agua. El sistema no debe seguir extrayendo aire sin reponerlo cuando se haya alcanzado la presión mínima. Tampoco



deberá superar la presión máxima impuesta por las características de la caverna.

- Profundidad.

La cavidad debe estar a una profundidad tal que la masa de tierra por encima de la caverna hagan que la presión natural del depósito sea mayor o igual a 20 bares, esto hace que para considerar una cavidad geológica para el almacenamiento de aire comprimido ésta deba estar a 150 metros o más.

- Aislamiento y estanqueidad

La cavidad no debe tener prácticamente ninguna fuga de aire. Los límites laterales, superior e inferior de la cavidad deben ser de una estructura geológica tal que impida el paso del aire, para ello se debe medir su permeabilidad al aire e idealmente ésta ha de mantenerse nula para el rango de presiones a los que trabajará el sistema.

Teniendo en cuenta estas magnitudes es obvio que cualquier formación geológica no resulta adecuada para el almacenamiento de aire comprimido. Sin embargo en el caso de España se han realizado estudios geológicos que muestran que en la península hay acuíferos salinos y domos de sal con una gran capacidad. Estos estudios se han realizado con el objetivo de buscar emplazamientos para el almacenaje de CO₂. Tras los resultados positivos de dichas investigaciones resulta lógico suponer que en España debe haber cavidades geológicas adecuadas para la implantación de un sistema CAES. Tan sólo se requerirá realizar estudios geológico específicos para sistemas CAES.



2.3 CRITERIOS DE LOCALIZACIÓN

Además de contar con la formación geológica adecuada para el almacenamiento de aire, la instalación se debe localizar próxima a:

- Líneas de alta tensión.

Cualquier instalación CAES debe estar conectada con una red de distribución eléctrica capaz de proporcionar la energía necesaria a los compresores cuando se esté comprimiendo aire y capaz de recibir la energía de las turbinas cuando el aire se esté expandiendo. La alta tensión de las líneas resulta fundamental ya que el sistema consume y genera gran cantidad de energía eléctrica y se busca que la pérdida en su transporte al nuevo punto de generación/consumo sea mínimo.

- Conductos de gas natural.

El combustible a utilizar en la cámara de combustión de los sistemas CAES será gas natural, se requiere de una fuente que proporcione un volumen adecuado de gas natural a presiones elevadas (9 bar).

Si por algún motivo la instalación no se podrá localizar próxima a estos dos elementos se deberá incluir en el cálculo de presupuestos del proyecto, lo que hará aumentar considerablemente la inversión a realizar y disminuirá la rentabilidad del proyecto.



Capítulo 3 MODELADO GENERAL CAES

Nomenclatura

M: masa (kg)

t: tiempo (s)

E: energía (kJ)

e: energía específica(kJ/kg)

W: trabajo (kJ)

w: trabajo específico(kJ/kg)

S: entropía(kJ/K)

s: entropía específica(kJ/kg-K)

Las ecuaciones fundamentales que se utilizarán [4] para el análisis termodinámico serán la conservación de la masa, la conservación de la energía y la ecuación del segundo principio de la termodinámica:

$$E. 1 \quad \frac{dM}{dt} = \dot{m}_e - \dot{m}_s$$

$$E. 2 \quad \frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \left(h + \frac{c^2}{2} + gz\right)_e \cdot \dot{m}_e - \left(h + \frac{c^2}{2} + gz\right)_s \cdot \dot{m}_s$$

$$E. 3 \quad \frac{dS}{dt} = \frac{\dot{Q}_e}{T_e} - \frac{\dot{Q}_s}{T_s} + \dot{m}_e \cdot s_e - \dot{m}_s \cdot s_s + \dot{S}_{gen}$$

Estas se aplicarán a volúmenes de control definidos por los límites del compresor, de la turbina, del depósito de aire comprimido, de los intercambiadores de calor, de la cámara de combustión y de cualquier componente que sea preciso analizar.

Las ecuaciones están formuladas con el criterio de signos clásico, el calor es positivo cuando entra al sistema y el trabajo cuando sale. Sin embargo no se



mantendrá este criterio sino que, en cada uno de los casos, las ecuaciones se formularán de tal manera que todos los términos queden positivos buscando la mayor claridad y simplicidad posible.

3.1 COMPRESIÓN

Se trata de un proceso adiabático no reversible que opera en régimen permanente. Realizando un balance energético (E. 2) al compresor obtenemos:

$$E. 4 \quad w_c = C_p (T_2 - T_1)$$

Siendo todos los términos positivos.

A partir de la definición de rendimiento isentrópico [4] de un compresor tenemos que:

$$E. 5 \quad \eta_c = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1}$$

Combinando las ecuaciones E. 37, E. 4 y E. 5 se llega a:

$$E. 6 \quad w_c = \frac{C_p \cdot T_1}{\eta_c} \cdot \left(\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right)$$

La ecuación E. 6 muestra el trabajo específico consumido por el compresor a partir de la relación de presiones salida-entrada, la temperatura de entrada y el rendimiento isentrópico del compresor.

3.2 EXPANSIÓN

La expansión es otro proceso adiabático no reversible que opera en régimen permanente. Realizando un balance energético (E. 2) a la turbina obtenemos:



$$E. 7 \quad w_t = C_p (T_3 - T_4)$$

Siendo todos los términos positivos.

A partir de la definición de rendimiento isentrópico [4] de una turbina tenemos que:

$$E. 8 \quad \eta_t = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4s}}$$

Combinando las ecuaciones E. 37, E. 7 y E. 8 se llega a:

$$E. 9 \quad w_t = C_p \cdot \eta_t \cdot T_3 \cdot \left(1 - \left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right)$$

La ecuación E. 9 muestra el trabajo específico generado en la turbina partir de la relación de presiones salida-entrada, la temperatura de entrada y el rendimiento isentrópico de la turbina.

3.3 ALMACENAMIENTO DE AIRE

Para deducir las ecuaciones que modelan el depósito de aire utilizaremos un volumen de control cuyos límites sean las paredes del depósito, de forma que se trate de un sistema abierto con una única entrada de aire que conecta con la salida del compresor y una única salida de aire que conecta con la entrada de la turbina. Cuando el sistema CAES comprima aire consumiendo energía eléctrica, el flujo másico de la turbina será nulo, mientras que cuando el sistema CAES expanda aire para recuperar la energía, el flujo másico del compresor será nulo. Es evidente que dM/dt , dE/dt y dS/dt del depósito serán no nulos a lo largo del ciclo CAES. El almacenamiento de energía únicamente se realiza en el depósito de aire, todos los demás componentes de la instalación CAES no acumularán ni materia ni energía.



Aplicando un balance másico al depósito de aire comprimido:

$$E. 10 \quad \frac{dM_d}{dt} = \dot{m}_c - \dot{m}_t$$

La ecuación de conservación de la energía queda:

$$E. 11 \quad \frac{dE_d}{dt} = \dot{m}_c \cdot C_p \cdot T_{din} - \dot{m}_t \cdot C_p \cdot T_{dout}$$

Mientras que el balance entrópico queda:

$$E. 12 \quad \frac{dS_d}{dt} = \dot{m}_c \cdot s_{din} - \dot{m}_t \cdot s_{dout} + \dot{S}_{gen}$$

Esta ecuación en principio no se necesitaría para el modelado. La única información adicional que nos da es la entropía generada. Sin embargo se ha considerado porque a la hora de realizar los diagramas de Sankey hay una pequeña pérdida de exergía en el depósito que no resulta nada intuitiva y que se podría pensar que es debido a una falta de precisión en el modelado. Sin embargo, esta pérdida es completamente legítima, se trata de una irreversibilidad producida al mezclar dos masas de aire a distintas temperaturas, el aire entrante a temperatura T_{din} y el aire del depósito a temperatura T_d .

El aire en el depósito se regirá por la ecuación de estado E. 3 y la energía almacenada en el depósito en cada instante de tiempo será:

$$E. 13 \quad E_d - E_{ref} = M_d \cdot C_v \cdot (T_d - T_{ref})$$

Para la referencia energética; la energía es nula a una temperatura de cero absoluto. De esta manera se evita trabajar con valores de energía almacenada negativos.

Con estas ecuaciones podemos proceder al modelado del depósito durante la etapa de compresión y de expansión.



3.3.1 ETAPA DE EXPANSIÓN; LLENADO DEL DEPÓSITO

La masa de aire del depósito en un tiempo $t+dt$ se calculará a partir de la masa del depósito en el tiempo t más el aumento de masa en el instante dt debido al flujo de entrada de aire:

$$E. 14 \quad Md(t + dt) \cong Md(t) + \dot{m}_c$$

Este flujo de entrada provoca también una variación de energía en el depósito, de modo que la energía del depósito en un tiempo $t+dt$ se calculará a partir de la energía del depósito en el tiempo t más el aumento de energía en el instante dt :

$$E. 15 \quad Ed(t + dt) \cong Ed(t) + \dot{m}_c \cdot C_p \cdot T_{din}(t)$$

Una vez conocidos la masa y energía del depósito se puede calcular su temperatura con:

$$E. 16 \quad T_d = \frac{E_d}{M_d \cdot C_v}$$

y su presión mediante la ecuación de estado:

$$E. 17 \quad P_d = \frac{M_d \cdot R_{aire} \cdot T_d}{V_d}$$

3.3.2 ETAPA DE COMPRESIÓN; VACIADO DEL DEPÓSITO

La masa de aire del depósito en un tiempo $t+dt$ se calculará a partir de la masa del depósito en el tiempo t menos la disminución de masa en el depósito en el instante dt debido al flujo de salida de aire:

$$E. 18 \quad Md(t + dt) \cong Md(t) + \dot{m}_s$$

Este flujo de salida provoca asimismo una variación de energía en el depósito, de modo que la energía del depósito en un tiempo $t+dt$ se calcula a partir de la



energía del depósito en el tiempo t menos la disminución de energía en el instante dt :

$$E. 19 \quad Ed(t + dt) \cong Ed(t) + \dot{m}_t \cdot C_p \cdot T_{dout}(t)$$

Una vez conocidos la masa y energía del depósito se puede volver a calcular la presión y temperatura de éste mediante las ecuaciones E. 15 y E. 16.

3.4 REFRIGERACIÓN

La temperatura del aire máxima que se puede alcanzar en el depósito está muy restringida (recordemos que se trata de una estructura geológica natural de un tamaño considerable y estamos buscando un impacto ambiental mínimo). Sin embargo a la salida del compresor se pueden alcanzar temperaturas de hasta 900°C. Para evitar que el depósito se sobrecaliente muy por encima de su temperatura natural el aire se refrigerará desde la temperatura de salida del compresor hasta una temperatura T_{din} .

El aire entra pues en el intercambiador de calor a una temperatura T_2 , proveniente de la salida del compresor, y saldrá a la temperatura T_{din} . La potencia que es necesaria extraer para alcanzar estas condiciones será:

$$E. 20 \quad \dot{Q}_r = \dot{m}_c \cdot C_p \cdot (T_2 - T_d)$$

El fluido usado para la refrigeración será agua, la temperatura de entrada será la del agua ambiente $T_{e-agua}=10^\circ\text{C}$ y evitaremos temperaturas de salida mayores de 50°C para reducir los impactos ambientales, por lo que $T_{s-agua}=50^\circ\text{C}$. Temperaturas de salida más restrictivas harán aumentar el caudal de agua necesario y con ello la potencia de la bomba de accionamiento.

$$E. 21 \quad \dot{Q}_i = \dot{m}_{agua} \cdot C_{p-agua} \cdot (T_{s-agua} - T_{e-agua})$$



Mientras que la potencia consumida por la bomba podemos aproximarla teniendo en cuenta una pérdida de presión en el circuito de agua de 1 bar que suele ser el valor aproximado que se toma en este tipo de intercambiadores de calor:

$$E. 22 \quad \dot{W}_{bomba} \cong \dot{m}_{bomba} \cdot v_{e-agua} \cdot \Delta p$$

3.5 CÁMARA DE COMBUSTIÓN

La temperatura óptima de trabajo a la entrada de una turbina suele ser elevada, la temperatura de entrada de la fase de turbinado de Huntford CAES plant alcanza los 825°C.

Sin embargo el aire ha sido almacenado a una temperatura muy baja para asegurar la estabilidad del depósito natural y evitar los impactos ambientales por lo que resulta necesario recalentarlo antes de su expansión en la turbina. Para ello se realiza una combustión utilizando gas natural como combustible. En la combustión se debe aumentar la temperatura del aire desde la temperatura a la que sale del depósito T_{dout} hasta la temperatura de entrada a la turbina T_3 .

La potencia requerida en la combustión será por tanto:

$$E. 23 \quad \dot{Q}_f = \dot{m}_t \cdot C_p \cdot (T_3 - T_d)$$

3.6 EFICIENCIA

A lo largo de las últimas décadas se han hecho numerosos estudios comparando la tecnología CAES con otro tipo de plantas energéticas. Sin embargo no resulta obvio definir un rendimiento CAES que nos dé una idea sobre cómo eficiente es el sistema almacenando energía, siendo ésta su función principal.

El problema surge por 2 motivos fundamentalmente:

Por un lado al sistema CAES le llegan dos entradas de energía completamente diferentes, electricidad al compresor y combustible a la cámara de combustión.



Una de ellas es energía barata que se consume de la red eléctrica para ser almacenada en momentos en los que el precio de la electricidad es bajo. La otra es gas natural cuyo coste es considerablemente mayor. Además estas dos entradas de energía se realizan en momentos de tiempo diferentes, la primera en la etapa de compresión y la segunda en la etapa de expansión.

Por otro lado el sistema no trabaja en régimen permanente; los saltos de presión, temperaturas, etc.. dependen del instante en el que nos encontremos, la cantidad de masa y energía en el depósito varían también a lo largo del tiempo. De esta manera resulta fundamental saber qué es un ciclo completo CAES y aplicar el rendimiento a dicho ciclo para que sea lo más objetivo posible:

Ciclo completo CAES

Un ciclo completo CAES consta de dos etapas; etapa de expansión y etapa de compresión. En la primera el depósito de aire se encuentra inicialmente a la presión y energía mínimas, el compresor comienza a trabajar aumentando la energía y presión del depósito, la etapa termina cuando la presión y energía del depósito son máximas. En la segunda etapa el depósito de aire se encuentra inicialmente a la presión y energía máximas, la turbina comienza a trabajar disminuyendo la energía y la presión del depósito, la etapa termina cuando la presión y energía del depósito son mínimas. A lo largo de un ciclo completo el depósito debe terminar en las mismas condiciones de presión y temperatura que en el inicio.

3.6.1 RENDIMIENTO TÉRMICO

Dado el gran parecido de un sistema CAES con un ciclo de gas parece lógico aplicar el rendimiento térmico usado en dichos ciclos:

$$E. 24 \quad \eta_{ter} = \frac{W_t - W_c}{Q_f}$$



El rendimiento térmico expresa qué parte de la potencia extraída del combustible se consigue convertir en trabajo mecánico. Sin embargo la función principal de un sistema CAES no es transformar el calor en trabajo, esto es tan solo un proceso necesario para realizar el almacenamiento de energía. El resultado es que este rendimiento no nos aporta información de cómo de bueno es el sistema almacenando energía. Además dependiendo de las condiciones puede darse el caso que el trabajo total del compresor sea mayor que el trabajo total de la turbina a lo largo de un ciclo, dando lugar a rendimientos negativos.

3.6.2 EFICIENCIA EXERGÉTICA

La eficiencia exergética compara el proceso real con un proceso ideal totalmente reversible. Como el sistema intercambia calor la definición sería:

$$E. 25 \quad \eta_{ex} = \frac{W_t}{W_c + I}$$

Es un rendimiento que resulta muy útil para saber cómo de perfecto es un proceso, sin embargo apliquemos este rendimiento a un ciclo CAES compuesto de procesos totalmente reversibles, es evidente que no habría irreversibilidades y que la eficiencia exergética saldría 100%. ¿Significaría esto que el sistema es extremadamente bueno almacenando energía? No, podría incluso darse el caso de que el sistema no almacenara absolutamente nada de energía, sino que estaría extrayendo toda la energía que necesita para el funcionamiento de la turbina del mismo combustible.

El problema de este rendimiento es que sólo tiene en cuenta las pérdidas de energía asociadas a irreversibilidades. No es adecuado para utilizarlo a la hora de diseñar una instalación CAES .



3.6.3 PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA

Debido a que no se ha encontrado una definición asentada de un rendimiento que muestre cómo de bueno es el sistema almacenando energía se ha procedido a definir uno. La idea es simple; el porcentaje de recuperación de energía expresará qué cantidad de la energía que se ha utilizado como trabajo en el compresor a lo largo del ciclo de compresión, se recuperará como trabajo en la turbina a lo largo del ciclo de expansión. De esta manera en el denominador tendremos el trabajo total del compresor W_c y en el numerador tendremos el trabajo total de la turbina menos un término proporcional a la exergía de calor transferida en la combustión.. De esta manera definimos el rendimiento como:

$$E. 26 \quad \eta_{CAES} = \frac{W_t - \Pi \cdot \left(1 - \frac{T_1}{\bar{T}_f}\right) Q_f}{W_c}$$

\bar{T}_f es la temperatura media entrópica de adición del calor en la cámara de combustión.

El término corrector Π expresa qué cantidad de la energía útil o exergía que llega a la turbina se transforma en energía mecánica. Como el proceso no es un proceso en régimen permanente se hará una media a lo largo del ciclo de expansión:

$$E. 27 \quad \Pi = \frac{\int_{P_{\max}}^{P_{\min}} \frac{w_t(t)}{\psi_3(t)} \cdot dt}{T_{\text{vaciado}}}$$

Para calcular energías y trabajos es necesario realizar integraciones ya que no se trata de un proceso en régimen permanente. De esta manera quedan definidas las siguientes magnitudes para ciclo completo:

$$W_c = \int_{P_{\min}}^{P_{\max}} \dot{W}_c(t) \cdot dt$$



$$Q_r = \int_{P_{\max}}^{P_{\min}} \dot{Q}_r(t) \cdot dt$$

$$W_t = \int_{P_{\max}}^{P_{\min}} \dot{W}_t(t) \cdot dt$$

$$Q_f = \int_{P_{\max}}^{P_{\min}} \dot{Q}_f(t) \cdot dt$$

A la hora de realizar las simulaciones se utilizarán las aproximaciones:

$$E. 28 \quad W_c(t + dt) \cong W_c(t) + \dot{m}_c \cdot w_c(t) \cdot dt$$

$$E. 29 \quad Q_r(t + dt) \cong Q_r(t) + \dot{m}_c \cdot q_r(t) \cdot dt$$

$$E. 30 \quad W_t(t + dt) \cong W_t(t) + \dot{m}_t \cdot w_t(t) \cdot dt$$

$$E. 31 \quad Q_f(t + dt) \cong Q_f(t) + \dot{m}_t \cdot q_f(t) \cdot dt$$

El porcentaje de recuperación de energía eléctrica definido con E. 26 podemos descomponerlo en tres términos diferenciados (compresión, almacenamiento y expansión) de modo que podamos ver rápidamente qué proceso es más susceptible de ser mejorado y dónde se producen las mayores pérdidas a la hora de almacenar energía.

Los términos en los que se descompone son:

$$E. 32 \quad \eta_{\text{compresión}} = \frac{Ex_{in}}{W_c}$$

$$E. 33 \quad \eta_{\text{depósito}} = \frac{Ex_{out}}{Ex_{in}}$$

$$E. 34 \quad \eta_{\text{expansión}} = \frac{W_t - \Pi \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_f}\right) \cdot Q_f}{Ex_{out}}$$

Y el porcentaje de recuperación de energía eléctrica será el producto de los 3 términos anteriores:



$$E. 35 \quad \eta_{CAES} = \eta_{compresión} \cdot \eta_{depósito} \cdot \eta_{expansión}$$

Siendo los términos Ex_{in} y Ex_{out} la energía utilizable o exergía total que ha llegado al depósito y que ha salido del depósito respectivamente:

$$Ex_{in} = \int_{P_{min}}^{P_{max}} \dot{m}_c \cdot \psi_d(t) \cdot dt$$

$$Ex_{out} = \int_{P_{max}}^{P_{min}} \dot{m}_t \cdot \psi_d(t) \cdot dt$$

La exergía o energía utilizable [4] es el máximo trabajo útil que se puede obtener de un sistema cuando éste evoluciona hasta el estado muerto intercambiando calor sólo con el ambiente, quien no puede ser el receptor del trabajo. Siendo el trabajo útil aquel que es entregado en valor neto al receptor. Estado muerto se entiende como el estado en el que el sistema se encuentra en equilibrio termodinámico con el ambiente, es decir, a su misma presión y temperatura.

Se han utilizado exergías en los porcentajes para tener un 100% como cota máxima. De esta manera un porcentaje del 100% en la compresión implica que no es necesario refrigerar el aire antes de su entrada en el depósito (no hay intercambiador; $Q_i=0$) y que el compresor trabaja sin irreversibilidades (el rendimiento isentrópico del compresor es 1), un porcentaje del 100% en el depósito implica que no hay pérdidas de presión (no hay fugas de aire), y un porcentaje del 100% en la expansión implica que no se requiere combustión ($Q_f=0$), que la turbina trabaja sin irreversibilidades (el rendimiento isentrópico de la turbina sería 1) y que los gases de escape salen a la temperatura ambiente (no tienen energía útil que pueda ser aprovechada). Por último cuando se cumplen todas las condiciones anteriores el sistema tiene un porcentaje de recuperación de energía eléctrica del 100%, y esto implica que absolutamente todo el trabajo que el compresor ha realizado durante la etapa de compresión será recuperado por la turbina a lo largo de la etapa de expansión en un ciclo completo.



3.7 CARACTERÍSTICAS DEL MODELO

Las presión y temperatura del depósito variarán con el tiempo, es aquí donde el proyecto se diferencia de la mayoría de estudios sobre sistemas CAES realizados hasta el momento que han considerando condiciones de régimen permanente a la hora de realizar los cálculos. En lugar de eso nos hemos interesado por las condiciones del sistema a lo largo del tiempo a medida que comprimimos o expandimos aire.

Se considerará el sistema sin ninguna pérdida de presión. Cualquier punto del sistema estará a presión atmosférica o a presión del depósito.

Como el aire es un gas diatómico se modelará como gas perfecto, por lo que su ecuación de estado será E. 36, con la constante universal de los gases ideales $R=8,314$ kJ/kmol-K. La masa molar del aire será $MM_{\text{aire}}=28.97$ kg/kmol y su exponente isentrópico $\gamma=1.4$

$$\text{E. 36} \quad P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Además se tendrá en cuenta para el compresor y la turbina que un proceso adiabático internamente reversible de un gas perfecto equivale a una politrópica de índice γ :

$$\text{E. 37} \quad \frac{T_{2s}}{T_1} = \left(\frac{P_{2s}}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

Para poder simular un ciclo completo CAES las condiciones de temperatura y presión iniciales del depósito deben ser iguales a las finales. Como no sabemos a priori cuales serán esas temperaturas debemos iterar con un valor inicial de temperatura de depósito, realizando ciclos completos hasta que la temperatura de inicio y fin del depósito sean la misma. Los intervalos de tiempo dt a la hora de realizar las iteraciones serán de 0.5 segundos, se ha comprobado que es un tiempo suficientemente pequeño para ser considerado infinitesimal. El error máximo permitido entre T_d -inicial y T_d -final es de 10^{-6} °C. El interés por el ciclo de



expansión y compresión completo es debido a que el rendimiento de la instalación CAES ha sido definido utilizando dicho ciclo.

Por último el depósito de aire se considerará totalmente estanco y adiabático. Las pérdidas por calor serán despreciables ya que el aire se almacena en el depósito prácticamente a temperatura ambiente. Las pérdidas por fugas de aire serán mínimas ya que en caso contrario deberemos buscar otra formación geológica más adecuada para la instalación CAES.

Capítulo 4 ANÁLISIS TERMODINÁMICO

4.1 INSTALACIÓN CAES BÁSICA

Idealmente, una instalación CAES constará simplemente de una turbina, un compresor, un motor generador y un depósito de aire.

Como no será necesario refrigerar el aire tras la compresión no se requerirá intercambiador de calor. Tampoco será necesario calentar el aire antes de su expansión en la turbina, por lo que tampoco constará de cámara de combustión.

El esquema de la instalación es:

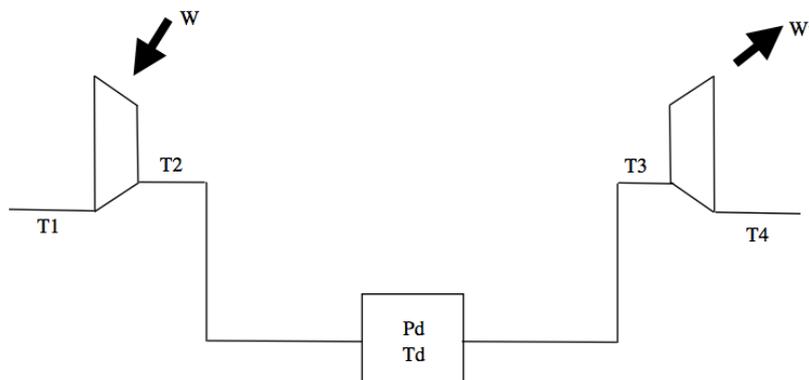


Figura 8. Esquema de una instalación CAES básica

4.1.1 VARIABLES DE ENTRADA

Las variables de entrada serán las condiciones ambientales del aire a la entrada, el gasto másico y rendimiento isentrópico del compresor, el gasto másico y



rendimiento isentrópico de la turbina y el volumen y rango de presiones del depósito.

Condiciones de operación	Valor	Unidades
<i>Condiciones ambientales</i>		
Presión	101.325	kPa
Temperatura	15	°C
<i>Compresor</i>		
Gasto másico compresor	100	Kg/s
Rendimiento isentrópico compresor	0.7	-
<i>Turbina</i>		
Gasto másico turbina	400	kg/s
Rendimiento isentrópico turbina	0.7	-
<i>Depósito</i>		
Volumen depósito	500 000	m ³
Presión máxima depósito	60	bar
Presión mínima depósito	40	bar

Figura 9. Características de diseño sistema CAES básico

Se han hecho algunas suposiciones que no son correctas en este primer caso a analizar. La primera es que el gasto másico en la turbina se mantiene constante a lo largo del ciclo, cuando la relación de presión de una turbina es elevada, el gasto másico se puede calcular como el gasto másico de una tobera y resulta proporcional a la raíz cuadrada de la temperatura del aire a la entrada. Esta temperatura variará a lo largo de la simulación. La segunda es que el rendimiento isentrópico de la turbina se mantiene constante a pesar de que la temperatura del aire a la entrada de la turbina no es constante. Hay que considerar que cuando la turbina no trabaja a la temperatura de trabajo a la que ha sido diseñada su rendimiento se ve afectado. Y la tercera y última es hacer despreciables las pérdidas de calor en el depósito, el aire se está almacenando a una temperatura



muy elevada que provocará transferencias de calor entre este y el contorno del depósito.

Sin embargo este primer modelo de instalación CAES básica nos servirá para entender el proceso, es el primer paso para entender los fundamentos de la tecnología CAES . Por eso es por lo que se ha comenzado por una instalación extremadamente sencilla y se han realizado las suposiciones anteriores.

4.1.2 DURACIÓN ETAPAS

Los tiempos totales de expansión, compresión y de ciclo completo son:

	Tiempo
Tiempo compresión	6 horas 8 min
Tiempo Expansión	1 hora 32 min
Tiempo ciclo completo	7 horas 40 min

Tabla 1. Tiempos de ciclo CAES convencional

El más significativo es el de expansión, éste será el tiempo que la central puede estar generando energía a su potencia nominal.

4.1.3 POTENCIA DEL COMPRESOR Y LA TURBINA

La potencia del compresor no dependerá del tipo de instalación CAES; básico, convencional, con regeneración o adiabático ya que el rango de presiones de trabajo queda fijado por las características del depósito, mientras que la temperatura de entrada es en todo momento la temperatura ambiente. Sin embargo la potencia de la turbina sí varía en esta instalación básica con respecto a los otros tipos de instalación considerados, debido a que temperatura del aire a la entrada de la turbina no se mantiene constante. Las potencias instantáneas a lo largo del ciclo quedan representadas por:

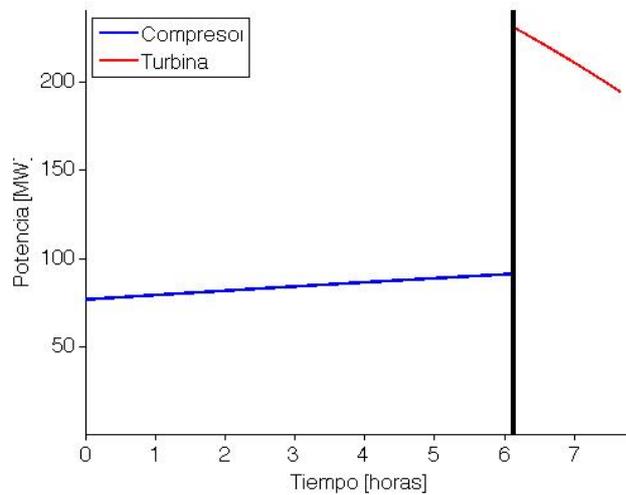


Figura 10. Potencias compresión expansión CAES básico.

4.1.4 CAPACIDAD DE LA PLANTA

La capacidad de la planta dependerá de la duración de la etapa de compresión y de la potencia a la que la turbina trabaja. La instalación es capaz de generar 200MW de potencia durante hora y media por lo que tendrá una capacidad de 300MWh. Este valor varía fuertemente con las características del depósito (Volumen y rango de presiones), sin embargo para el depósito para el que se ha modelado que tiene un volumen elevado y un rango de presiones aceptable la capacidad de la instalación no tiene un valor tan elevado como cabría esperar.

4.1.5 TEMPERATURAS Y PRESIONES

Las temperaturas varían a lo largo del tiempo según:

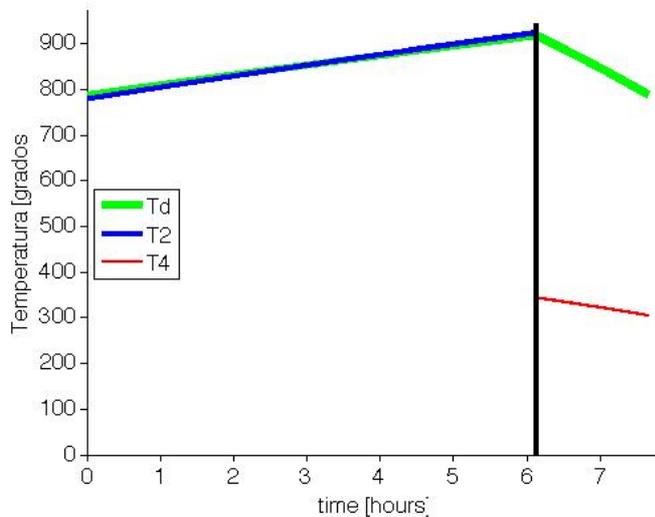


Figura 11. Temperaturas CAES básico

Podemos apreciar las altas temperaturas que se alcanzan en el depósito T_d , y la poca diferencia que hay a lo largo de toda la compresión entre la temperatura de entrada de aire en el depósito y el propio aire del depósito.

El rango de temperaturas y presiones que soportará cada elemento de la instalación será:

	Tmin[°C]	Tmax[°C]	Pmin[bar]	Pmax[bar]
Entrada aire compresor	15	15	1.01	1.01
Salida compresor - Entrada depósito	779.9	924.4	40	60
Aire almacenado en el depósito	917.3	787.1	40	60
Salida depósito - Entrada turbina	917.3	787.1	40	60
Salida aire turbina	304.6	343.6	1.01	1.01

Tabla 2. Temperaturas CAES básico

Vemos que el depósito alcanza temperaturas de más de 900°C, lo que dañaría gravemente la formación geológica.



4.1.6 ANÁLISIS EXERGÉTICO

La energía útil o exergía total transferida de un punto a otro de la instalación mediante flujos de aire, así como el trabajo total del compresor y de la turbina a lo largo de un ciclo completo quedan reflejados en la tabla siguiente:

	Valor Energía útil [GJ]
Trabajo compresor	1861.0
Irreversibilidades compresor	161.4
Salida del compresor / Entrada depósito	1700.0
Irreversibilidades depósito	0.2
Salida depósito / Entrada turbina	1699.8
Trabajo turbina	1174.3
Irreversibilidades turbina	304.9
Gases de escape	220.5

Tabla 3. Exergías CAES básico

Las irreversibilidades generadas en el depósito debido a la mezcla de dos masas de aire a distinta temperatura se pueden considerar despreciables. Esto es debido a que la temperatura del aire entrante en el depósito es prácticamente la misma temperatura que la del aire del depósito, condición que se cumple durante toda la etapa de compresión como puede apreciarse en la Figura 11.

4.1.6.1 Diagrama de Sankey etapa de compresión

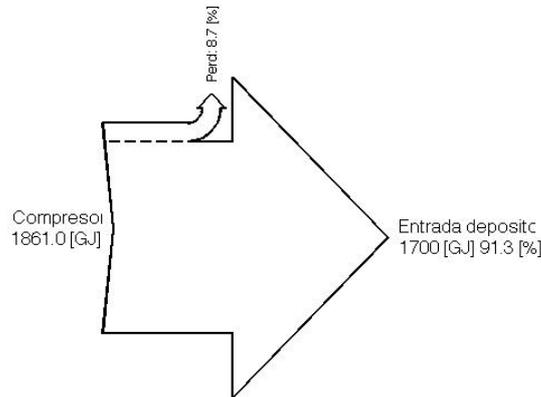


Figura 12. Diagrama de Sankey compresión CAES básico

Se observa que prácticamente todo el trabajo del compresor se almacenará en el depósito como energía útil. Las únicas pérdidas de exergía son debidas a que el compresor no trabaja isentrópicamente y se producen por tanto irreversibilidades. El porcentaje de recuperación de esta etapa dependerá exclusivamente del rendimiento isentrópico del compresor. La siguiente tabla muestra la variación en el porcentaje de recuperación en la etapa de compresión variando el rendimiento isentrópico del compresor y dejando todas las demás características de la central invariables.

Rendimientos isentrópicos del compresor	0.6	0.7	0.8	0.9	1
Porcentaje recuperación compresión	89,12%	91.3%	93,92%	96,83%	100%

Tabla 4. Porcentaje de recuperación compresión CAES básico

4.1.6.2 Diagrama de Sankey etapa de almacenamiento

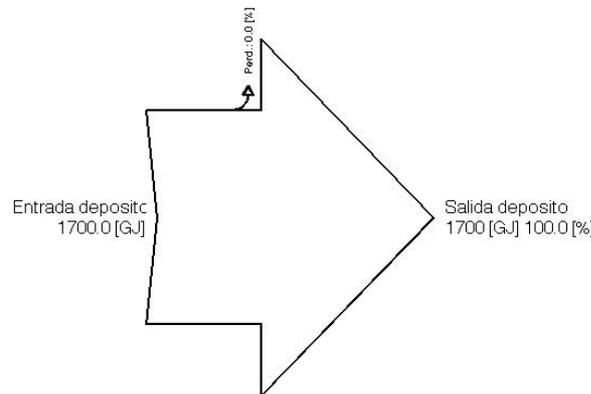


Figura 13. Diagrama de Sankey almacenamiento CAES básico

Como ya hemos mencionado apenas hay irreversibilidades a la hora de mezclar el aire en el depósito y como se ha considerado que no hay fugas de aire ni transferencia de calor (el depósito mantiene su energía), prácticamente toda la energía útil que llega del flujo másico del compresor será recuperada por el flujo de la turbina.

El porcentaje de recuperación de esta etapa es prácticamente 100% como puede apreciarse en el diagrama de Sankey:

Porcentaje de recuperación etapa de almacenamiento	99.99%
--	--------

Tabla 5. Porcentaje de recuperación almacenamiento CAES básico

4.1.6.3 Diagrama de Sankey de la etapa de expansión

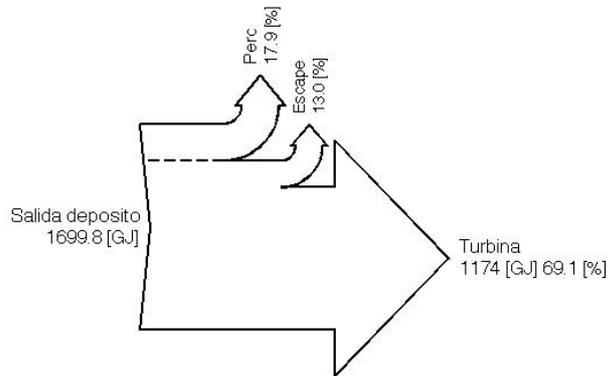


Figura 14. Diagrama Sankey expansión CAES básico

La energía útil extraída del depósito llega directamente a la turbina. Una parte se perderá en la propia turbina debido a irreversibilidades y otra se perderá junto con el aire de escape. La energía restante es transformada en trabajo en la turbina.

Porcentaje de recuperación etapa de expansión	69.1%
---	-------

Tabla 6. Porcentaje de recuperación expansión CAES básico

4.1.7 PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA

Una vez obtenidos los rendimientos de cada una de las etapas se puede obtener el rendimiento CAES total mediante la ecuación E. 35:

Porcentaje de recuperación de energía	63.10%
--	---------------

Tabla 7. Porcentaje de recuperación de energía CAES básico

La interpretación es la siguiente: **A lo largo de una etapa completa de expansión, la turbina es capaz de recuperar el 63.10% del trabajo consumido previamente por el compresor durante una etapa completa de compresión.**

Esta instalación resulta inviable técnicamente debido a 2 motivos principalmente. Primero por las altas temperaturas alcanzadas en el depósito, se debe respetar la temperatura natural del depósito, y segundo porque la temperatura de entrada del

aire en la turbina variaría fuertemente en función del condiciones de presión y temperatura del depósito, además temperaturas de entrada excesivamente bajas no son técnicamente posibles.

4.2 *INSTALACIÓN CAES CONVENCIONAL*

Con el fin de abordar los problemas técnicos que la instalación CAES básica plantea (elevadas temperaturas en el depósito y temperatura de entrada a la turbina variable) se añaden dos componentes más al sistema. Un intercambiador de calor (aftercooler) que refrigerará el aire a la salida salida del compresor antes de ser almacenado, de forma que la temperatura de entrada al depósito esté controlada y tenga un valor constante T_{din} . Y una cámara de combustión necesaria para calentar el aire frío que sale del depósito hasta la temperatura óptima de entrada a la turbina T_3 . De esta forma surge la primera instalación CAES operativa en el mundo, la central CAES de Huntorf (Figura 15):

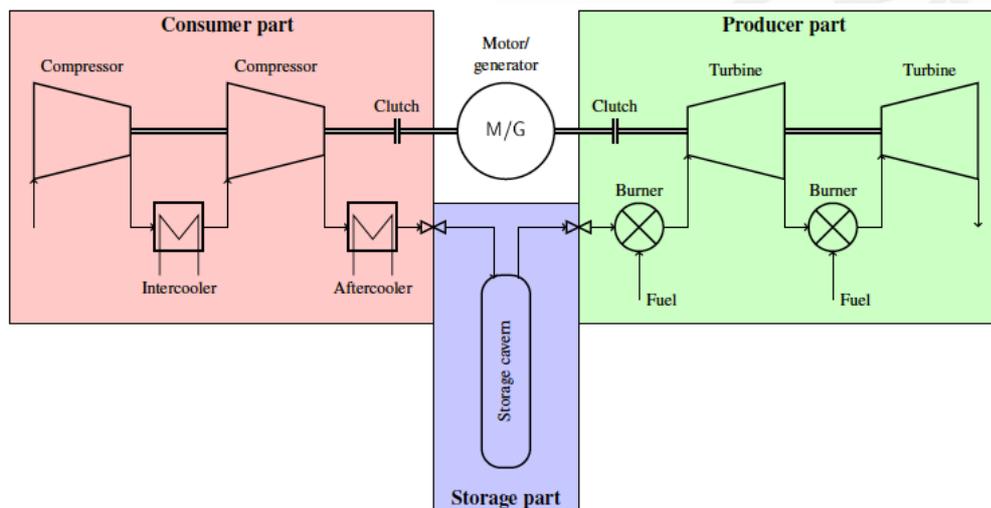


Figura 15. Instalación CAES en Huntorf, Alemania.

En esta instalación, con el objetivo de mejorar la eficiencia del sistema en su conjunto, se han utilizado 2 compresores con inter-refrigeración entre ellos lo que da lugar a dos saltos de presión. Mientras que para la expansión se utilizan 2 turbinas, una de baja presión y otra de alta. El aire es calentado mediante cámaras de combustión a la entrada de cada turbina. La instalación no cuenta con un motor/generador, sino que están separados, de forma que no se utilizan embragues para acoplar y desacoplar las turbinas y los compresores, sino que los compresores estarán siempre acoplados al motor y las turbinas al generador.

El esquema que se utilizará para la simulación con MATLAB del sistema CAES convencional será:

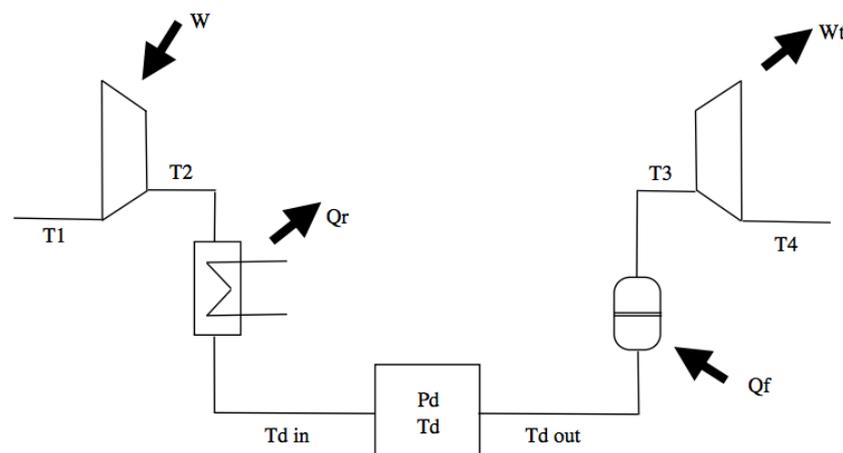


Figura 16. Esquema instalación CAES convencional

Los sistemas multi-compresión y multi-expansión que utilizan más de un compresor y más de una turbina respectivamente se sustituirán por un único compresor y una única turbina, sin embargo se tendrá en cuenta a la hora de realizar las simulaciones ya que se consiguen rendimientos térmicos que no se podrían alcanzar utilizando un único compresor o una única turbina.



4.2.1 VARIABLES DE ENTRADA

Las variables necesarias para la simulación con Matlab del sistema CAES convencional se han tomado de las condiciones de operación de la planta de energía de Huntorf:

Condiciones de operación	Valor	Unidades
<i>Condiciones ambientales</i>		
Presión	101.325	kPa
Temperatura	15	°C
<i>Compresor</i>		
Gasto másico compresor	108	Kg/s
Temperatura de salida refrigeración	50	°C
Rendimiento isentrópico compresor	0.85	-
<i>Turbina</i>		
Gasto másico	417	kg/s
Temperatura de entrada	825	°C
Rendimiento isentrópico	0.85	-
<i>Depósito</i>		
Volumen	300 000	m ³
Presión máxima	72	bar
Presión mínima	46	bar

Tabla 8. Características Huntorf Power Plant

4.2.2 DURACIÓN ETAPAS

El tiempo total de expansión, compresión y de ciclo completo es:

	Valor	Huntorf
Tiempo compresión	15 horas 27 min	-



Tiempo expansión	4 horas	3-4 horas
Tiempo ciclo	19 horas 27 min	-

Tabla 9. Tiempos de ciclo CAES convencional

Si comparáramos la instalación CAES con una batería de energía, el tiempo necesario para cargarla sería unas 4 veces mayor de lo que tardaría en descargarse. En la realidad no se realizan compresiones y expansiones de ciclo completo, sino que se almacena y se libera energía en función de variables ajenas a la instalación, como la curva de demanda energética a lo largo del día. Sin embargo sí podemos decir que para poder recuperar la energía liberada se necesita 4 veces más tiempo comprimiendo aire del que se ha pasado expandiéndolo, por lo tanto la mayor parte del tiempo el sistema CAES estará comprimiendo aire en el depósito.

Huntford CAES plant tiene una capacidad máxima de 290MW que puede mantener durante 3-4 horas, este valor no es muy diferente del obtenido con el modelo numérico.

4.2.3 POTENCIA DEL COMPRESOR Y DE LA TURBINA

La potencia instantánea del compresor y de la turbina a lo largo del ciclo se muestra en la siguiente figura:

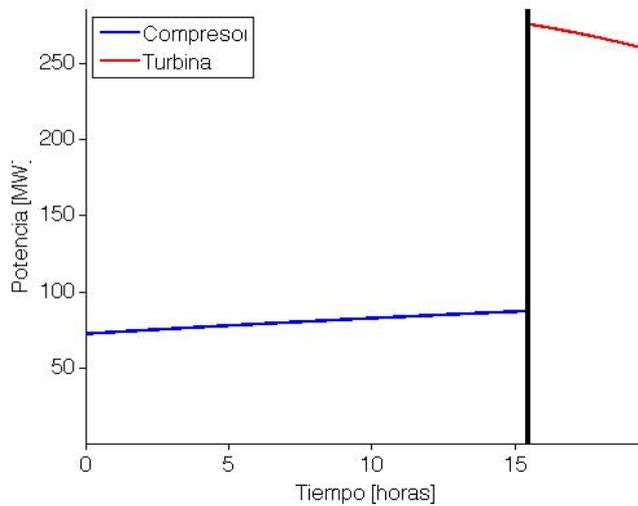


Figura 17. Potencias expansión compresión CAES convencional

Comparándolas con la capacidad de potencia medias del compresor y de la turbina de la planta de energía de Huntorf podemos decir que a pesar de la simplicidad del modelo utilizado, éste da resultados razonablemente realistas.

	Modelo	Huntorf	Unidades
Potencia compresor	60-80	60	MW
Potencia turbina	280-260	290	MW

Tabla 10. Comparación potencias medias Huntorf-modelo

4.2.4 CAPACIDAD ENERGÉTICA

Como el sistema es capaz de generar una potencia de 270MW durante 4 horas de expansión, la capacidad energética del sistema será de unos 1080MWh. Si la comparamos con la capacidad energética del sistema CAES básico llegaremos a lo que parece ser un contrasentido; el volumen del depósito de la instalación CAES básica es considerablemente mayor que el volumen utilizado con esta instalación y sin embargo la capacidad energética es menor de la mitad. ¿A qué es



debido este hecho? A que en esta instalación se ha incorporado un componente que añade energía al sistema, la cámara de combustión.

4.2.5 TEMPERATURAS Y PRESIONES

La temperatura de entrada de aire en el depósito se mantiene constante mediante refrigeración en $T_{din}=50^{\circ}C$. Mientras que la temperatura de entrada de aire en la turbina también se mantiene constante aportando calor mediante una combustión en $T_3=825^{\circ}C$. Todas las demás temperaturas varían a lo largo del tiempo según:

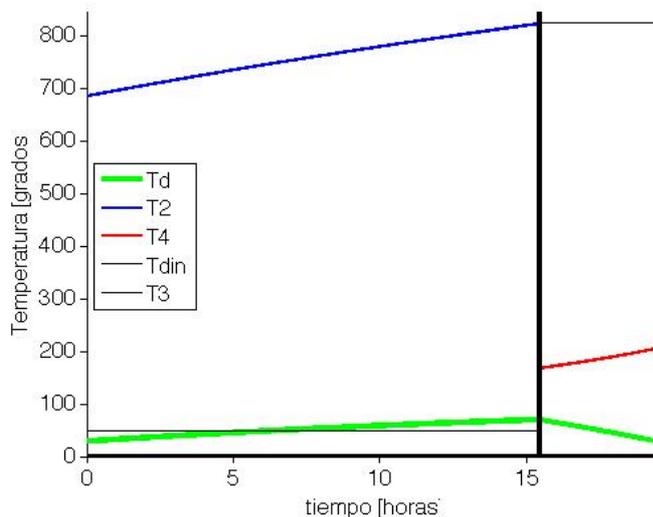


Figura 18. Temperaturas CAES convencional

Para la elección de material del circuito de aire, el rango de temperaturas y presiones que debe soportar cada punto de la instalación es:

	$T_{min}[^{\circ}C]$	$T_{max}[^{\circ}C]$	$P_{min}[bar]$	$P_{max}[bar]$
Entrada aire compresor	15	15	1.01	1.01
Salida aire compresor	684.4	822	46	72
Entrada aire depósito	50	50	46	72
Aire almacenado en el depósito	28.7	69.9	46	72
Salida aire depósito	28.7	69.9	46	72
Entrada aire turbina	825	825	46	72
Salida aire turbina	167.7	205.4	1.01	1.01



Tabla 11. Temperaturas CAES convencional

Las temperaturas, presiones y capacidades de la planta son similares a las temperaturas de una central térmica de gas típica, por eso la instalación utiliza los mismos compresores, turbinas y equipos en general.

La diferencia fundamental es que la instalación CAES tiene un depósito de aire para almacenar energía, y la temperatura de dicho depósito está muy restringida. A pesar de que el flujo de aire entra en el depósito a una temperatura máxima de 50°C se observa que la temperatura máxima alcanzada por el aire del depósito son 69.9°C.

Este resultado que no resulta intuitivo se explica por el trabajo de flujo, siempre que haya un flujo entrante en un sistema no sólo aumentamos su energía una cantidad igual a la energía interna de la masa añadida, sino que el entorno tiene que realizar un trabajo específico $P_e \cdot v_e$ sobre el sistema para vencer la fuerza debida a la presión en la superficie de entrada. Este trabajo, denominado trabajo de flujo y contenido en la entalpía, provoca que la temperatura del depósito T_d llegue a superar la temperatura de entrada T_{din} . Esto quiere decir que si queremos disminuir la temperatura máxima que alcance el depósito de aire a lo largo del ciclo a un valor T_{max} , la temperatura a la que debemos introducir el aire será menor que T_{max} .

4.2.6 ANÁLISIS EXERGÉTICO

La energía útil o exergía total transferida de un punto a otro de la instalación mediante flujos de aire, el trabajo total del compresor y de la turbina, y las exergías asociadas a las transferencias de refrigeración y de combustión a lo largo de un ciclo completo quedan reflejados en la tabla siguiente:

	Energía útil [GJ]
Trabajo compresor	4477.1
Irreversibilidades compresor	198.7



Salida del compresor	4278.4
Calor refrigerado	2251.4
Entrada depósito	2027.0
Irreversibilidades depósito	1.1
Salida depósito	2025.9
Calor de combustión	2548.5
Entrada turbina	4574.4
Trabajo turbina	3861.5
Irreversibilidades turbina	492.7
Gases de escape	220.3

Tabla 12. Exergías CAES convencional

Las irreversibilidades generadas en el depósito debido a la mezcla de dos masas de aire a distinta temperatura ya no son completamente despreciables como en el caso anterior. La temperatura del aire entrante en el depósito se mantiene constante en 50°C mediante refrigeración mientras que la temperatura del aire del depósito varía desde 28.7°C hasta 69.9°C, dependiendo del instante en el que nos encontremos se generarán mas o menos irreversibilidades por la mezcla de masas de aire a distintas temperaturas.

4.2.6.1 Diagrama de Sankey etapa de compresión

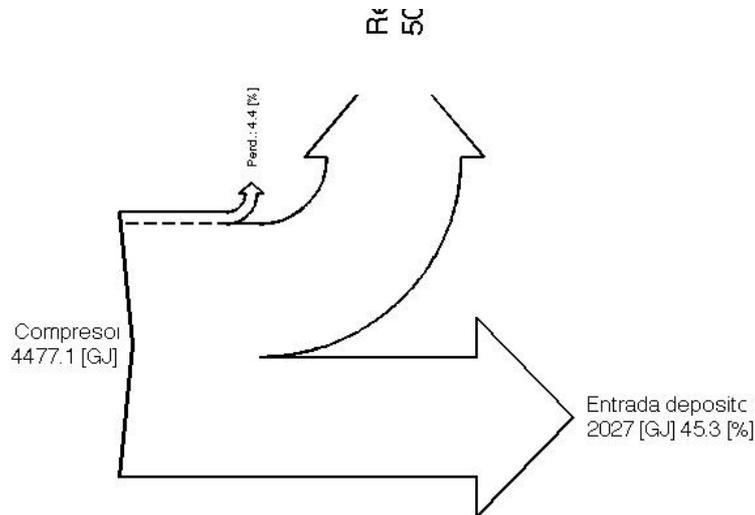


Figura 19. Diagrama de Sankey CAES convencional

En este diagrama se observa porqué el porcentaje de recuperación de energía de los sistemas CAES adiabáticos es tan bajo.

En el compresor hay unas pérdidas por irreversibilidad del 4.4% ya que el compresor no es isentrópico, sin embargo la mayoría del trabajo del compresor se transfiere al aire en forma de exergía de flujo. Hasta este punto todo perfecto.

El problema radica en que muy poca de esta exergía llegará a ser almacenada finalmente en el depósito. El hecho de que el aire se deba almacenar a temperaturas bajas provoca una pérdida de exergía de hasta el 50% del trabajo total del compresor. En otras palabras, en la refrigeración del aire se pierde la mitad de la energía útil absorbida durante la compresión. Esto hace que el porcentaje de recuperación de esta etapa sea mucho más bajo que el que tendríamos si no refrigeráramos el aire.

Porcentaje de recuperación etapa de compresión	45.27%
--	--------

Tabla 13. Porcentaje de recuperación compresión CAES convencional

Con una instalación similar sin refrigeración se alcanzaban rendimientos del 90%.

4.2.6.2 Diagrama de Sankey etapa de almacenamiento

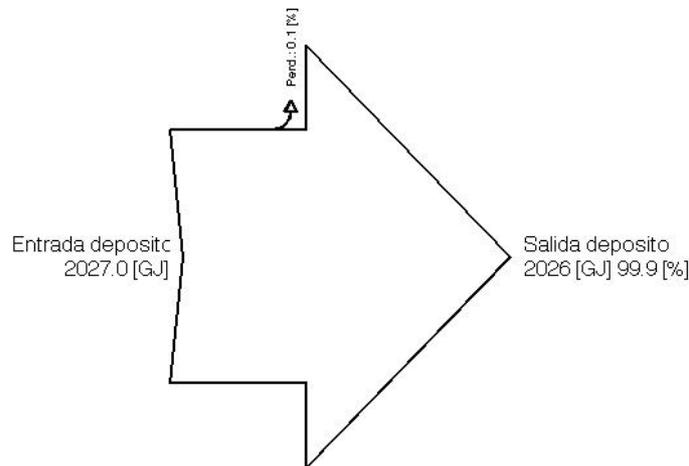


Figura 20. Diagrama de Sankey almacenamiento CAES convencional

El porcentaje de recuperación de esta etapa seguirá siendo muy alto, al igual que en la instalación CAES básica, aunque las irreversibilidades generadas en el depósito debido a la mezcla de dos masas de aire a distinta temperatura ya no serán completamente despreciables. La temperatura del aire entrante en el depósito se mantiene constante en 50°C mediante refrigeración mientras que la temperatura del aire del depósito varía desde 28.7°C hasta 69.9°C, dependiendo del instante en el que nos encontremos se generarán mas o menos irreversibilidades por la mezcla de masas de aire a distintas temperaturas. Las irreversibilidades totales a lo largo de un ciclo supondrán el 0.05% de la exergía entrante en el depósito, valor muy bajo pero a tener en cuenta en el diseño de la instalación.

Porcentaje de recuperación etapa de almacenamiento	99.95%
--	--------

Tabla 14. Porcentaje de recuperación almacenamiento CAES convencional

Como en todo el proyecto se ha considerado el depósito completamente aislado (tal y como se hace en la mayor parte de los estudios sobre la tecnología CAES), por lo general el porcentaje de recuperación no bajará del 99% en ningún tipo de

instalación CAES, ya que las irreversibilidades generadas en el depósito son muy bajas.

4.2.6.3 Diagrama de Sankey etapa de expansión

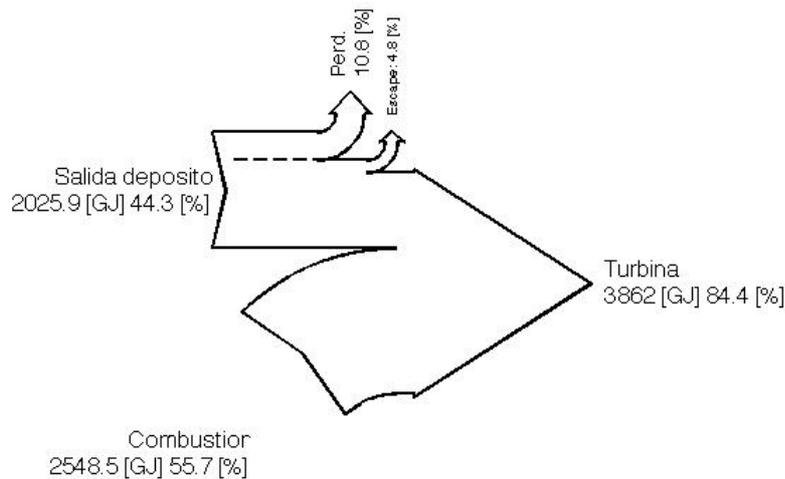


Figura 21. Diagrama de Sankey expansión CAES convencional

En este diagrama se observa como se “compensa” la pérdida de energía útil por refrigeración en la etapa de compresión.

Las bajas temperaturas de almacenamiento de aire provocan la necesidad de una cámara de combustión que eleve la temperatura del aire hasta 825°C antes de su entrada en la turbina. Cuanto mayor sea la exergía perdida en la refrigeración mayor será la exergía de combustión a aportar.

Esta energía útil se transfiere inicialmente al aire en la cámara de combustión a través de calor, una parte de dicha exergía se transformará en trabajo en la turbina y otra parte se perderá en el aire de escape y por irreversibilidades en la turbina.

Lo importante es diferenciar esta energía útil con el trabajo del compresor. la energía calorífica de la combustión NO llega a ser almacenada en ningún momento, es únicamente la energía del trabajo del compresor la que se almacena en el depósito. Éste es el motivo por el que a la hora de calcular el porcentaje de recuperación de energía se prescindía de la exergía de combustión.



Porcentaje de recuperación etapa de expansión	84,42%
---	--------

Tabla 15. Porcentaje de recuperación expansión CAES convencional

4.2.7 RENDIMIENTO CAES

Una vez obtenidos los rendimientos de cada una de las etapas se puede obtener el porcentaje de recuperación de energía total de la instalación mediante la ecuación E. 35:

Porcentaje de recuperación de energía	38.20%
---------------------------------------	--------

Tabla 16. Porcentaje de recuperación de energía total CAES convencional

La interpretación es siempre la misma: **A lo largo de una etapa completa de expansión, la turbina es capaz de recuperar el 38.20% del trabajo consumido previamente por el compresor durante una etapa completa de compresión.**

El motivo principal por el que haya descendido tanto con respecto a la instalación CAES básica, a pesar de que incluso se haya utilizado un compresor y una turbina más eficientes (debido a que modelan una etapa multi-compresión y multi-expansión respectivamente), es fundamentalmente por la necesidad técnica de refrigerar el aire. A continuación se verá cómo varía el porcentaje de recuperación de energía de la instalación en función de la temperatura de entrada en el depósito:

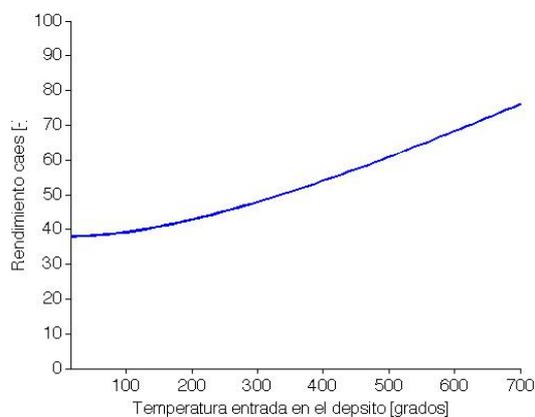


Figura 22. Porcentaje de recuperación de energía - Temperatura de entrada depósito



Cuanto mayor sea la temperatura a la que podemos introducir el aire en el depósito, menor será la potencia de refrigeración necesaria y con ello menor potencia de combustión hará falta para alcanzar los 825°C a la entrada de la turbina. Todo ello implicará menores pérdidas de energía a lo largo del ciclo y hará aumentar el rendimiento.

Sin embargo la restricción de la temperatura en el depósito no nos permite alcanzar temperaturas de más de 70-80°C, y el aumento que se consigue a costa de poner al límite la estabilidad del depósito natural es mínimo. Si nos fijamos en la curva de la Figura 22 el aumento de rendimiento comienza a ser apreciable a partir de los 100°C, temperatura que en ningún caso podremos llegar a alcanzar en el depósito natural. Por lo que aumentar la temperatura de entrada en el depósito no es el camino para mejorar el porcentaje de recuperación del sistema CAES, al contrario, deberemos refrigerarla lo máximo posible para asegurar la estabilidad del depósito.

4.3 INSTALACIÓN CAES ADIABÁTICA

La instalación CAES adiabática [7] es el siguiente paso a dar en cuanto a tecnología CAES se refiere. Como se ha visto en la instalación CAES convencional, la refrigeración supone una pérdida de hasta el 50% del trabajo del compresor, para luego tener que volver a recalentar el aire mediante una combustión. La idea de un sistema CAES adiabático consiste en aprovechar el calor de refrigeración para recalentar el aire a la salida del depósito, pudiendo reducir incluso a 0 el calor de combustión necesario.

La idea de aprovechar el calor de refrigeración de un compresor en ciclos de gas se conoce como recuperación y no resulta novedosa en absoluto. Sin embargo para una instalación CAES puede resultar extremadamente innovadora, hasta el punto que hace 30 años aproximadamente cuando se construyeron las dos únicas centrales CAES del mundo no se tuvo ni siquiera en cuenta la opción de



aprovechar el calor de refrigeración en el propio sistema. El motivo vuelve a ser que la etapa de expansión se produce en un momento de tiempo y la etapa de expansión en otro. Entre ambas etapas transcurrirá un tiempo más o menos largo en el que la energía calorífica debe ser almacenada si se quiere extraer de una etapa para aprovecharla en la otra.

En los últimos años se han realizado numerosos estudios sobre el concepto de CAES adiabático que han ayudado a identificar los puntos técnicos clave que necesitan desarrollarse en profundidad; Un dispositivo acumulador de energía térmica y un compresor adiabático (no refrigerado) para que la temperatura de salida sea la máxima posible.

A comienzos de 2010 se ha iniciado un proyecto en Alemania destinado a construir y testear la primera central CAES adiabática del mundo. Esta central tendrá una capacidad de potencia de 200MW y utilizará un acumulador de calor construido con un tipo especial de hormigón diseñado específicamente para este fin.

Los desafíos técnicos que el sistema CAES adiabático plantea y que están actualmente en desarrollo e investigación son:

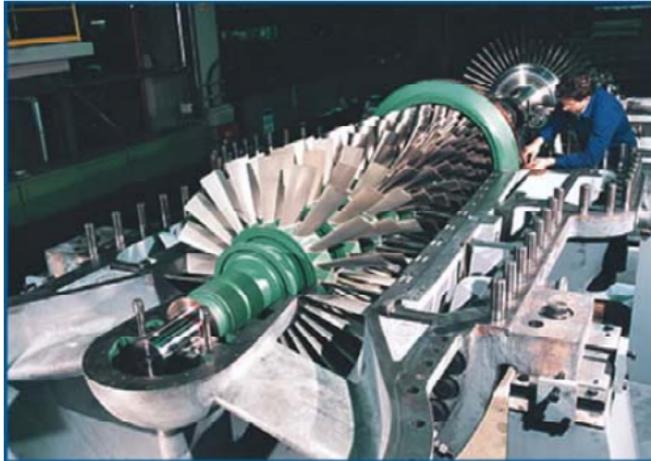
- Compresor:

En las dos plantas CAES actuales se han utilizado compresores industriales, y debido a la gran flexibilidad de modelos y características disponibles se podría buscar el más adecuado para la instalación CAES adiabática. Sin embargo los compresores que trabajan a altas presiones son generalmente con multi-etapas e inter-refrigerados, de forma que a consta de reducir trabajo en la compresión perdemos exergía en los inter-refrigeradores. Para el CAES convencional esto no suponía un ningún problema ya que de todas formas el fluido debía ser refrigerado antes de su entrada en el depósito y ésta era una energía perdida. Sin embargo para el sistema CAES adiabático el calor de refrigeración se almacenará en el acumulador de energía térmica, por lo que resulta necesario que el aire salga del compresor a la máxima temperatura posible y que toda la refrigeración se realice



post-compresión. Por lo tanto se requerirá un nuevo diseño de compresor que trabaje a altas presiones y temperaturas de salida.

Los diseños actuales más prometedores [7] constan de un compresor axial de baja presión en serie con un compresor radial de alta presión.



Ejemplo de compresor axial.

- Acumulador de energía térmica

El acumulador será un elemento fundamental en el porcentaje de recuperación de la instalación CAES adiabática. Se busca que el acumulador tenga una capacidad de 120-1200MWh que y que pueda mantener su temperatura en ciclos completos de de 4 a 12 horas.

Entre las numerosas posibilidades de diseño disponibles, el más prometedor consiste en materiales almacenadores de calor que entren en contacto directo con el aire, de forma que no sea necesario el uso de intercambiadores de calor y las irreversibilidades por intercambiar calor a diferencias finitas de temperatura sean mínimas. Además se buscará que el área de contacto material-aire sea el mayor posible. Esto requerirá de un acumulador de calor presurizado, ya que si tiene que estar en contacto con el aire se encontrará a su misma presión. A pesar de que esto implique un mayor coste este diseño es el más favorable en la actualidad. El material del acumulador puede elegirse de entre una gran variedad disponible que se suele utilizar para regeneradores, por ejemplo piedra natural, hormigón o metales. Estos materiales ofrecen una gran variedad de costes y características

termo-físicas, por lo que hay un gran rango de opciones económicamente atractivas entre las que elegir. La durabilidad es una característica que merece una atención especial aquí. El acumulador tendrá que tener un periodo de vida de más de 30 años, utilizándose diariamente en unas condiciones de presión, temperatura y humedad exigentes.

Finalmente se está optando por el uso de estructuras cilíndricas de hormigón precomprimido [7], tienen una gran durabilidad y son capaces de almacenar grandes cantidades de energía térmica. Sin embargo hacen falta más estudios y experimentación para concluir sobre cómo será su comportamiento finalmente en la realidad.

El esquema de la instalación CAES adiabática es el siguiente:

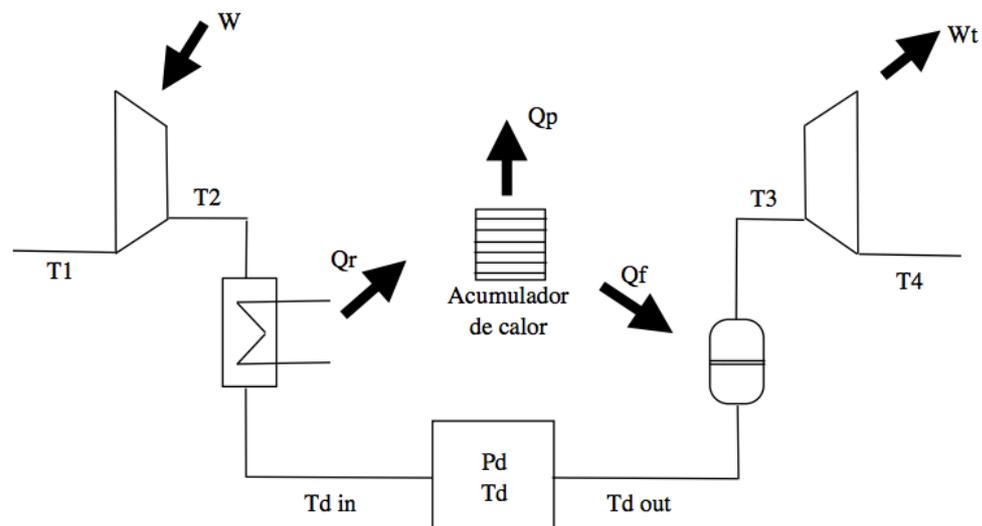


Figura 23. Esquema instalación CAES adiabática

Si nos fijamos en las características del esquema la única variación que hay con respecto al sistema CAES convencional es el uso de un acumulador de calor y una pérdida de eficiencia en el compresor debido a que trabajará a alta presión y temperatura y no será inter-refrigerado, por lo que es de esperar una disminución en su rendimiento térmico. Sin embargo los valores de Q_r y Q_f serán muy



parecidos a los de una planta CAES convencional con las mismas características de temperatura de entrada de depósito y temperatura de entrada de la turbina. Sin embargo la refrigeración se realizará directamente a través del acumulador y no será necesario el uso de una bomba de agua. La cámara de combustión sí será necesaria para cuando el calor proveniente del recuperador no sea suficiente para recalentar el aire a la temperatura de trabajo óptima de la turbina.

La falta de experiencias con acumuladores térmicos hace difícil su simulación numérica ya que no sabemos cómo será su comportamiento. El rendimiento del sistema acumulador de energía térmica lo hemos considerado como la cantidad de calor útil recuperado del calor refrigerado:

$$E. 38 \quad \eta_{\text{acumulador}} = \frac{\left(1 - \frac{T_0}{T_{rec}}\right) \cdot Q_{rec}}{\left(1 - \frac{T_0}{T_r}\right) \cdot Q_r}$$

4.3.1 VARIABLES DE ENTRADA

Se han mantenido las variables de entrada de la instalación CAES convencional, al rendimiento del acumulador se le ha dado un valor conservador de 0.6:

Condiciones de operación	Valor	Unidades
<i>Condiciones ambientales</i>		
Presión	101.325	kPa
Temperatura	15	°C
<i>Compresor</i>		
Gasto másico compresor	108	Kg/s
Temperatura de salida refrigeración	50	°C



Rendimiento isentrópico compresor	0.8	-
<i>Acumulador</i>		
Volumen	15000	m ³
Rendimiento	0.6	-
<i>Turbina</i>		
Gasto másico	417	kg/s
Temperatura de entrada	825	°C
Rendimiento isentrópico	0.85	-
<i>Depósito</i>		
Volumen	300 000	m ³
Presión máxima	72	bar
Presión mínima	46	bar

Tabla 17. Características central CAES adiabática

4.3.2 DURACIÓN ETAPAS

El tiempo total de expansión, compresión y de ciclo completo es:

	Valor
Tiempo compresión	15 horas 27 min
Tiempo expansión	4 horas
Tiempo ciclo	19 horas 27 min

Tabla 18. Tiempos de ciclo CAES adiabático

Los mismos tiempos que la central CAES convencional, ya que sus depósitos de aire tienen las mismas características.



4.3.3 POTENCIA DEL COMPRESOR Y DE LA TURBINA

La potencia instantánea del compresor y de la turbina a lo largo del ciclo se muestra en la siguiente figura:

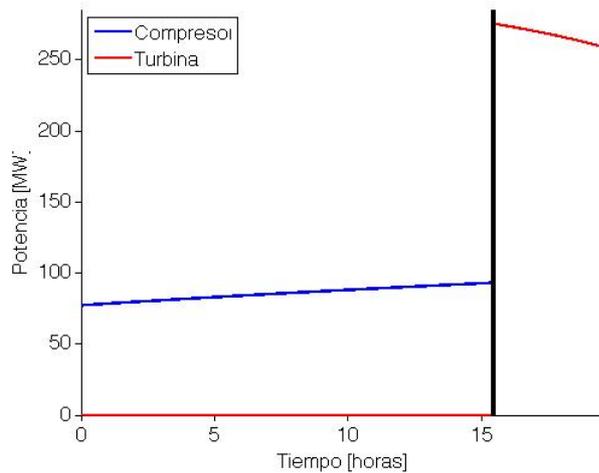


Figura 24. Potencias expansión compresión CAES adiabático

La potencia consumida por el compresor aumenta ligeramente comparado con la instalación CAES convencional, esto es debido a que el rendimiento del compresor es ligeramente menor.

4.3.4 CAPACIDAD ENERGÉTICA

Misma capacidad energética de 1080MWh que la estación CAES convencional anterior.

4.3.5 TEMPERATURAS Y PRESIONES

La temperatura de entrada de aire en el depósito se mantiene constante mediante refrigeración en $T_{din}=50^{\circ}\text{C}$. Mientras que la temperatura de entrada de aire en la turbina también se mantiene constante aportando calor recuperado de la



refrigeración y mediante una combustión en $T_3=825^\circ\text{C}$. Las demás temperaturas varían a lo largo del tiempo según:

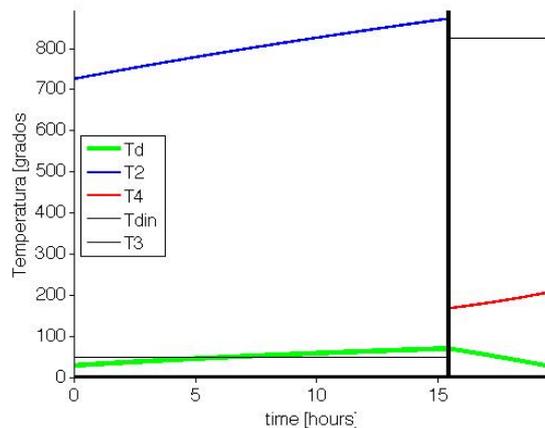


Figura 25. Temperaturas CAES adiabático

Temperaturas muy similares a la instalación CAES convencional, tan sólo la temperatura de salida del compresor aumenta debido a que el rendimiento del compresor es menor. Esto provocará que el calor total refrigerado sea mayor. Esto que puede ser muy perjudicial en un sistema CAES convencional no lo es en el adiabático ya que gran parte de la energía refrigerada será recuperada en la expansión.

Además habrá que estudiar el material a emplear en la salida de aire del compresor ya que las temperaturas del modelo (temperaturas de hasta 1000 grados) son las que se alcanzarán realmente, ya que el compresor no será inter-refrigerado.

4.3.6 ANÁLISIS EXERGÉTICO

Es aquí donde se aprecian las ventajas de una instalación CAES adiabática. La energía útil o exergía total transferida de un punto a otro de la instalación mediante flujos de aire, los trabajos totales del compresor y de la turbina, y las



exergías asociadas a las transferencias de calor de la refrigeración, de la combustión y del calor recuperado por el acumulador a lo largo de un ciclo completo quedan reflejados en la tabla siguiente:

	Energía útil [GJ]
Trabajo compresor	4456.9
Irreversibilidades compresor	275.2
Salida del compresor	4481.7
Calor refrigerado	2454.7
Pérdidas calor	981.9
Entrada depósito	2027.0
Irreversibilidades depósito	1.1
Salida depósito	2025.9
Calor recuperado	1472.8
Calor de combustión	1075.7
Entrada turbina	4574.4
Trabajo turbina	3861.5
Irreversibilidades turbina	492.7
Gases de escape	220.3

Tabla 19. Exergías CAES adiabático

Vemos que se producen más pérdidas por irreversibilidades en el compresor pero por otro lado se utiliza mucho menos combustible y la refrigeración ya no supone una total pérdida de exergía.

4.3.6.1 Diagrama de Sankey etapa de compresión

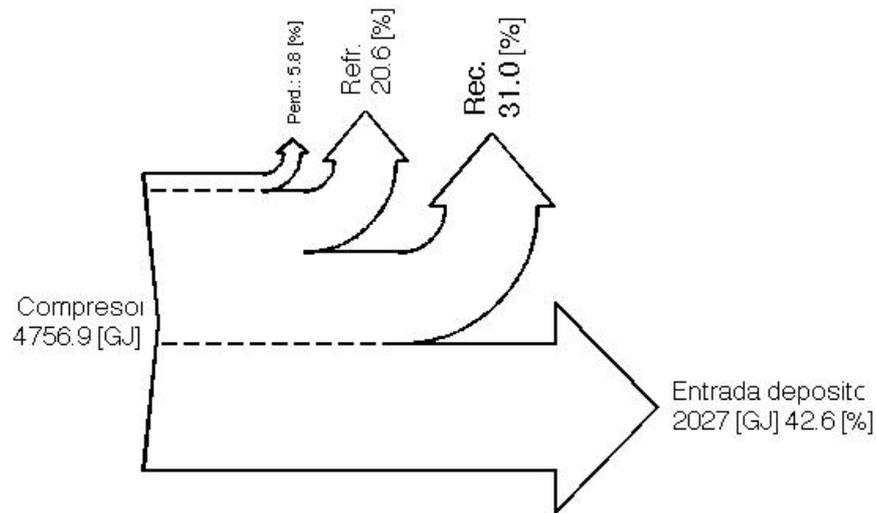


Figura 26 Diagrama de Sankey compresión CAES adiabático

A pesar de que el valor de la energía útil que llega al depósito tiene aproximadamente el mismo valor que con el CAES convencional (en realidad es ligeramente menor) ahora se almacena energía también en forma de calor en el acumulador por lo que gran parte de la exergía perdida en la refrigeración se podrá recuperar.

En el compresor hay unas pérdidas por irreversibilidad del 5.8% ya que el compresor no es isentrópico. Además sigue habiendo pérdidas asociadas a la refrigeración ya que el rendimiento del acumulador no es del 100% .

El porcentaje de recuperación de esta etapa crítica ha aumentado considerablemente con respecto a la instalación CAES convencional:

Porcentaje de recuperación etapa de compresión	73.57%
--	--------

Tabla 20. Porcentaje de recuperación compresión CAES adiabático

Con una instalación CAES convencional se alcanzaban porcentajes del 45%.



4.3.6.2 Diagrama de Sankey etapa de almacenamiento

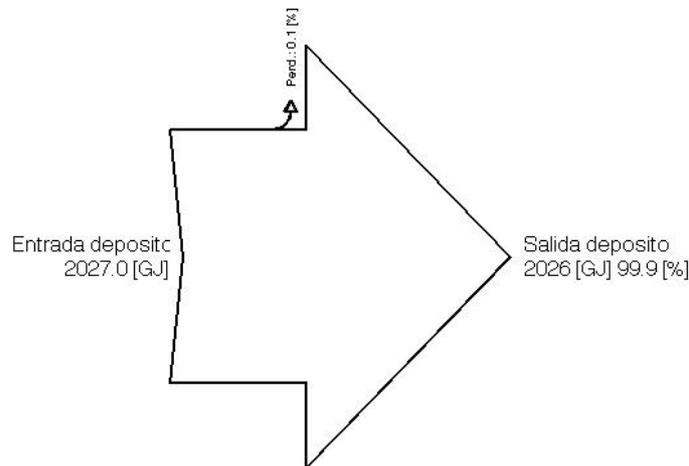


Figura 27. Diagrama de Sankey almacenamiento CAES adiabático

Mismas características que la instalación CAES convencional y porcentaje de recuperación de la etapa elevado:

Porcentaje de recuperación etapa de almacenamiento	99.95%
--	--------

Tabla 21. Porcentaje de recuperación almacenamiento CAES adiabático

4.3.6.3 Diagrama de Sankey etapa de expansión

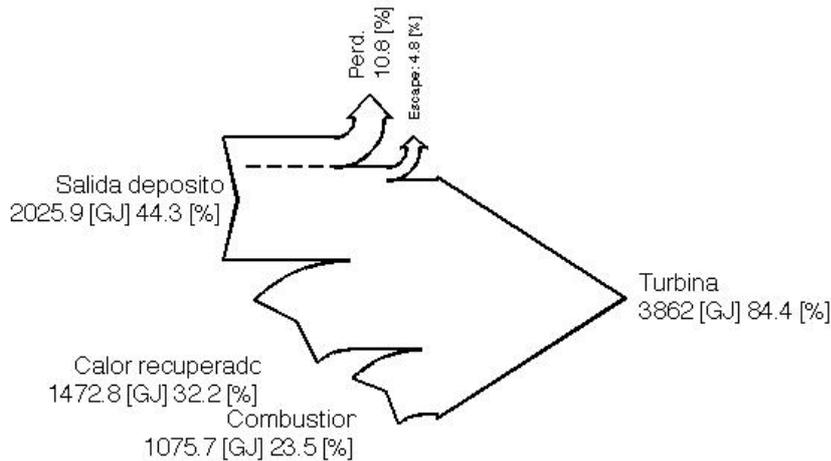


Figura 28. Diagrama de Sankey expansión CAES adiabático

Y aquí aparece finalmente el calor recuperado, con ello disminuimos considerablemente la cantidad de combustible requerido que aunque no tiene impacto sobre el porcentaje de recuperación si reducirá considerablemente los costes de operación al reducir la cantidad de combustible requerido.

Porcentaje de recuperación etapa de expansión	84,42%
---	--------

Figura 29. Porcentaje de recuperación expansión CAES adiabático

4.3.7 PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA

Una vez obtenidos los rendimientos de cada una de las etapas se puede obtener el rendimiento CAES total de la instalación mediante la ecuación E. 35:

Porcentaje de recuperación de energía	62.07%
---------------------------------------	--------

Tabla 22. Porcentaje de recuperación de energía CAES adiabático

La interpretación del rendimiento se mantiene: **a lo largo de una etapa completa de expansión, la turbina es capaz de recuperar el 62.07% del trabajo**



consumido previamente por el compresor durante una etapa completa de compresión.

Se ha conseguido pasar de un rendimiento de menos del 38% a un rendimiento de más del 62% siendo conservadores en el comportamiento del acumulador. Además, el rendimiento ya no es tan fuertemente dependiente de la temperatura de entrada del depósito de aire, ya que cuanto más energía refrigeremos más energía podrá luego ser recuperada. De lo que sí dependerá será de cómo de eficiente sea la acumulación de calor y de cuánto exergía perdamos en la compresión debido al uso de compresores de alta presión y temperatura sin inter-refrigeración. En principio hemos supuesto que podremos recuperar un 60% de la exergía refrigerada, sin embargo rendimientos del acumulador de energía térmica mayores mejorarán aún más el porcentaje de recuperación de energía del sistema:

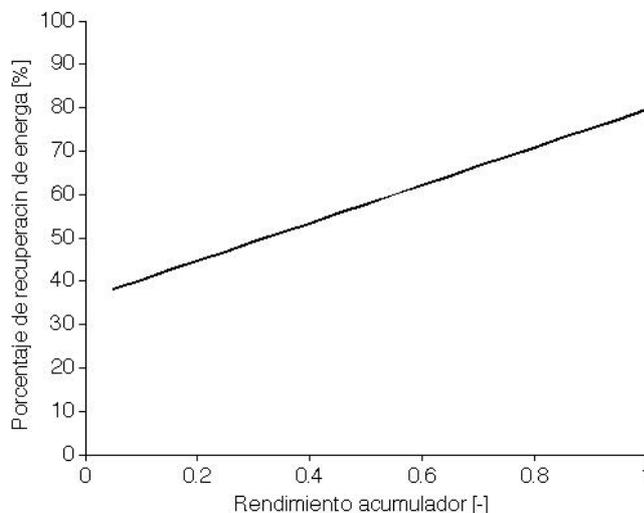


Figura 30. Porcentaje de recuperación de energía- rendimiento del acumulador

De aquí se deduce la importancia del desarrollo de un acumulador de energía térmica eficiente y económico.



Capítulo 5 VIABILIDAD ECONÓMICA

La viabilidad económica de una instalación CAES dependerá de la diferencia de precio de la energía eléctrica cuando el sistema esté expandiendo aire y cuando esté comprimiéndolo. Esto depende del mercado eléctrico en el que se encuentra la instalación.

Por ejemplo en el mercado eléctrico español el precio máximo y mínimo horario de la energía eléctrica a lo largo del periodo 2008-2012 ha sido:

Año	Precio mínimo	Precio máximo	Unidades
2008	49.0	76.0	Euros/MWh
2009	26.4	46.7	Euros/MWh
2010	23.6	49.8	Euros/MWh
2011	38.2	57.7	Euros/MWh
2012	33.2	56.8	Euros/MWh

Tabla 23. Precio energía eléctrica

Para que podamos considerar siquiera la rentabilidad del sistema se ha de cumplir que el precio máximo por el porcentaje de recuperación de energía menos el precio mínimo sea positivo. En caso de ser negativo el hecho de que estemos almacenando energía eléctrica no nos estaría dando ningún beneficio, sino que nos estaría perjudicando y en lugar de hacer una instalación CAES sería mas conveniente hacer una central térmica normal y corriente, que obtuviera toda la energía necesaria para mover la turbina directamente del combustible.

El porcentaje de recuperación de energía mínimo a considerar para que el almacenamiento de energía sea económicamente beneficioso es el precio mínimo de la energía entre el precio máximo. Los porcentajes de recuperación de energía



mínimos para que podamos considerar la implantación de un sistema CAES en el mercado español serían:

Año	%mínimo	CAES convencional	CAES adiabático
2008	64.47%	-	-
2009	56.53%	-	+
2010	47.39%	-	+
2011	66.2%	-	-
2012	58.45%	-	+

Tabla 24. Precio energía eléctrica

En ningún caso se plantearía la construcción de un sistema CAES convencional a la vista de esta tabla, mientras que si mejoráramos el acumulador de energía térmico del CAES adiabático sí podría ser un proyecto viable en España. De ahí el interés por desarrollar esta tecnología.



Capítulo 6 CONCLUSIONES

Desde un punto de vista técnico este proyecto ha servido para entender el sistema CAES termodinámicamente y saber cual es el estado de la tecnología CAES actual y cuáles son las principales líneas de investigación y desarrollo.

Se ha definido además el porcentaje de recuperación de energía del sistema, de modo que fijándonos en el ratio entre el precio de la energía eléctrica mínimo y máximo en un mercado energético tengamos una primera idea de si almacenarla nos resultará rentable o por el contrario será una carga económica para el sistema.

La modelización con MATLAB nos ha permitido obtener este porcentaje para una instalación CAES convencional y para una instalación CAES adiabática. La convencional está muy restringida por su bajo valor (38%) hasta el punto que la energía tendría que ser prácticamente gratuita para que almacenarla fuera rentable. Por ello la central CAES de Huntorf sirve como soporte para picos inusuales de demanda eléctrica y se carga excedentes de energía procedentes de parques eólicos.

Por el contrario, el sistema CAES adiabático tiene un elevado porcentaje de recuperación de energía que hace que almacenar energía sea casi siempre económicamente beneficioso, y esto unido al hecho que su consumo de combustible es mucho menor le dan una gran ventaja sobre el CAES convencional. El único punto negativo del CAES adiabático es que no hay ninguna instalación operativa en el mundo y que el acumulador de energía térmica y el compresor de altas presiones sin refrigeración se encuentran todavía en fase de diseño. Algunos proyectos que están en marcha serán decisivos para comprobar el comportamiento de estos dos elementos en la práctica.

En España hay una gran capacidad instalada de energía eólica y los parques cuentan con unas elementos de “descarga” para cuando la energía generada no pueda ser absorbida por la red. El hecho de que esta energía sea gratuita y pueda



ser utilizada para comprimir aire en un sistema CAES hacen que el almacenaje de energía sea siempre económicamente beneficioso. Por lo que complementar instalaciones CAES con parques eólicos es un escenario a tener en cuenta en el futuro mix energético español.



Capítulo 7 FUTUROS DESARROLLOS

En relación con la mejora en la precisión de la simulación con MATLAB se podría:

- Modelizar el comportamiento complejo de un grupo de compresores con inter-refrigeración, teniendo en cuenta las pérdidas de presión en los inter-refrigeradores y la relación de presiones óptima en cada etapa. De la misma manera se podría modelizar el comportamiento de una fase de turbinado en varias etapas con recalentamientos.
- Utilizar un modelo de aire que se ajuste más a la realidad, utilizando tablas para la obtención de las propiedades del aire.

Y en relación con los resultados, una vez conocido el bajo porcentaje de recuperación de energía de los sistemas CAES convencionales y que éstos solo resultan viables combinados con fuentes de energía renovable se podría realizar por ejemplo un estudio económico de un parque eólico combinado con una instalación CAES. Para ver si mejoraría la rentabilidad del sistema con respecto a la rentabilidad esperada sin la instalación CAES.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] José Agüera Soriano; *Mecánica de fluidos incompresibles y turbomáquinas hidráulicas*; ISBN 84-95391-01-05
- [2] Claudio Mataix; *Turbomáquinas térmicas*; Tercera edición
- [3] (CAES) Plant (110 MW-26h), Volume 1 (December 1992).
- [4] José Ignacio Linares Hurtado; *Fundamentos de termodinámica técnica*; Septiembre 2009
- [5] Ahmed Faheem Zobaa; *Energy Storage - Technologies and Applications*; ISBN 978-953-51-0951-8; Chapter 4; 23 January, 2013
- [6] Brian Elmegaard and Wiebke Brix; *Efficiency of Compressed Air Energy Storage*; The 24th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems : The 2011 conference motto: International Smart Energy Networks of Cooperation for Sustainable Development; 2011
- [7] Chris Bullough, Christoph Gatzen, Christoph Jakiel³, Martin Koller⁴, Andreas Nowi⁵, Stefan Zunft; *Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage for the Integration of Wind Energy*; Proceedings of the European Wind Energy Conference, EWEC 2004, 22-25 November 2004, London UK.
- [8] Raúl Lugo, Juan M. Zamora, Martín Salazar, Miguel Toledo; *Relaciones de Presiones Óptimas de los Ciclos Complejos de las Turbinas de Gas*; On-line version ISSN 0718-0764



Parte II CÓDIGO FUENTE



Capítulo 1 SISTEMA CAES BÁSICO

```
clear all           %clear all the variables
close all          %close all the open figures

edit=1;           %if "edit"=0 no figures
editSankey=1;     %if "edit"=1 show figures

format longg

%*****
% PARAMETROS CONOCIDOS tomados de las características de
% Huntford CAES plant
%*****
modo=0;           %0:compresion 1:expansion

gamma=1.4;        %Exponente isentropico del aire [-]
MMaire=28.97;     %Masa molar del aire[kg/kmol]
Raire=8.314472/MMaire; %Constante del aire
Cp=gamma*Raire/(gamma-1); %Calor especifico del aire [kJ/kg-K]
Cv=Raire/(gamma-1); %Calor especifico del aire [kJ/kg-K]

V=500000;         %Volumen del deposito [m^3]
Pmax=60*10^2;     % Presiones maxima y minima de trabajo
Pmin=40*10^2;     % [kPa]

T1=15+273.15;    %temperatura de entrada del aire[K]
Patm=101.325;    %Presion de entrada del aire [kPa]

mt=400;          %Gasto masico turbina [kg/s]
mc=100;          %Gasto masico compresor [kg/s]

rend_compresor=0.7; % Rendimientos de la turbina y el compresor
rend_turbina=0.7;  % [-]

%*****
%Parámetros de modelo
%*****
dt=0.5;          %intervalos de tiempo en los que se integra [s]

L=2;             %Longitud minima vectores

n_iteraciones=0;
eps=10^-6;       %precision que buscamos en la temperatura de entrada

in=1;

Tentrada=800;

i=2;
```



```
while in | (abs(Td(1)-Td(i))>eps & n_iteraciones<100)
    %*****
    % INICIALIZAMOS LAS VARIABLES PARA CADA NUEVA SIMULACION
    %*****

    Pd=zeros(L,1);      %Presion en el deposito [kPa]
    Md=zeros(L,1);      %Masa de aire en el deposito[kg]

    Ed=zeros(L,1);      %Energia almacenada en el dep?sito [kJ]

    wc=zeros(L,1);      %Potencia especifica de compresion[kJ/kg]

    Wc=zeros(L,1);      %Energia compresion[kJ]

    wt=zeros(L,1);      %Potencia especifica de la turbina[kJ/kg]
    Wt=zeros(L,1);      %Energia turbina[kJ]

    T2=zeros(L,1);      %Temperaturas [K]
    Td=zeros(L,1);
    T3=zeros(L,1);
    T4=zeros(L,1);

    %*****
    % SIMULACION DE UN CICLO COMPLETO SIMPLE
    %*****
    Pd(1)=Pmin;          %Presion inicial del deposito[K]
    Td(1)=Tentrada;      %Temperatura entr. del deposito[K]
    Md(1)=Pd(1)*V/(Raire*Td(1)); %Masa de aire inicial deposito
    Ed(1)=Td(1)*Md(1)*Cv; %Energia inicial dep?sito[kJ]

    i=1;
    while Pd(i)<Pmax
        %modelado compresor
        wc(i)=Cp*T1/rend_compresor*((Pd(i)/Patm)^((gamma-1)/gamma)-
1);

        T2(i)=(T1+wc(i))/Cp;

        %modelado deposito
        Md(i+1)=Md(i)+mc*dt;
        Ed(i+1)=Ed(i)+mc*Cp*T2(i)*dt;

        %Estado del dep?sito
        Td(i+1)=Ed(i+1)/(Md(i+1)*Cv);
        Pd(i+1)=Md(i+1)*Raire*Td(i)/V;

        i=i+1;
    end
    T_llen=i/(3600)*dt; %tiempo etapa compresion [h]

    while Pd(i)>Pmin

        T3(i)=Td(i);

        %modelado turbina
        wt(i)=Cp*T3(i)*rend_turbina*(1-(Patm/Pd(i))^((gamma-
1)/gamma));
```



```
T4(i)=T3(i)-wt(i)/Cp;

%modelado dep?sito
Md(i+1)=Md(i)-mt*dt;
Ed(i+1)=Ed(i)-mt*Cp*T3(i)*dt;

%Estado del dep?sito
Td(i+1)=Ed(i+1)/(Md(i+1)*Cv);
Pd(i+1)=Md(i+1)*Raire*Td(i)/V;

i=i+1;
end
T_total=i/(3600)*dt; %tiempo total del ciclo [h]
T_vac=T_total-T_llen; %tiempo etapa expansion

Tin=Td(1)
Tentrada=Td(i);

n_iteraciones=n_iteraciones+1;

in=0;
end
n_iteraciones

Tentrada=Td(i)

%*****
% INICIALIZAMOS LAS VARIABLES PARA LA ÚLTIMA SIMULACIÓN
%*****

Pd=zeros(L,1); %Presion en el deposito [kPa]
Md=zeros(L,1); %Masa de aire en el deposito[kg]

Ed=zeros(L,1); %Energia almacenada en el dep?sito [kJ]

wc=zeros(L,1); %Potencia especifica de compresion[kJ/kg]
Wc=zeros(L,1); %Energia compresion[kJ]

wt=zeros(L,1); %Potencia especifica de la turbina[kJ/kg]
Wt=zeros(L,1); %Energia turbina[kJ]

%Inicializaci?n exergias de flujo[kJ/kg]
ex2=zeros(L,1);
sum_Ex2=zeros(L,1);
exd=zeros(L,1);
sum_Exd=zeros(L,1);
ex3=zeros(L,1);
sum_Ex3=zeros(L,1);
ex4=zeros(L,1);
sum_Ex4=zeros(L,1);

T2=zeros(L,1); %Temperaturas [K]
Td=zeros(L,1);
T3=zeros(L,1);
```



```
T4=zeros(L,1);

%*****
% SIMULACION DEL ULTIMO CICLO CALCULANDO TODAS LAS VARIABLES
%*****
Pd(1)=Pmin; %Presion inicial del deposito[K]
Td(1)=Tentrada; %Temperatura de entrada del deposito[K]
Md(1)=Pd(1)*V/(Raire*Td(1)); %Masa de aire inicial deposito
Mdin=Md(1);
Ed(1)=Td(1)*Md(1)*Cv; %Energia inicial contenida en el deposito

i=1;
while Pd(i)<Pmax
    %modelado compresor
    wc(i)=Cp*T1/rend_compresor*((Pd(i)/Patm)^((gamma-1)/gamma)-1);
    T2(i)=T1+wc(i)/Cp;

    Wc(i+1)=Wc(i)+mc*wc(i)*dt;

    %modelado deposito
    Md(i+1)=Md(i)+mc*dt;
    Ed(i+1)=Ed(i)+mc*Cp*T2(i)*dt;

    %Estado del deposito
    Td(i+1)=Ed(i+1)/(Md(i+1)*Cv);
    Pd(i+1)=Md(i+1)*Raire*Td(i)/V;

    %calculo de exergias
    ex2(i)=Cp*(T2(i)-T1)-T1*Cp*log(T2(i)/T1)+T1*Raire*log(Pd(i)/Patm);
    sum_Ex2(i+1)=sum_Ex2(i)+mc*ex2(i)*dt;

    i=i+1;
end
T_llen=i/(3600)*dt; %tiempo etapa compresion [h]

Wt(i)=0;
sum_Ex3(i)=0;
sum_Ex4(i)=0;

while Pd(i)>Pmin

    T3(i)=Td(i);

    %modelado turbina
    wt(i)=Cp*T3(i)*rend_turbina*(1-(Patm/Pd(i))^(gamma-1)/gamma);
    T4(i)=T3(i)-wt(i)/Cp;

    Wt(i+1)=Wt(i)+mt*wt(i)*dt;

    %modelado deposito
    Md(i+1)=Md(i)-mt*dt;
    Ed(i+1)=Ed(i)-mt*Cp*T3(i)*dt;

    %Estado del dep?sito
    Td(i+1)=Ed(i+1)/(Md(i+1)*Cv);
    Pd(i+1)=Md(i+1)*Raire*Td(i)/V;

    %calculo de exergias
```



```
ex3(i)=Cp*(T3(i)-T1)-T1*Cp*log(T3(i)/T1)+T1*Raire*log(Pd(i)/Patm);
sum_Ex3(i+1)=sum_Ex3(i)+mt*ex3(i)*dt;

ex4(i)=Cp*(T4(i)-T1)-T1*Cp*log(T4(i)/T1)+T1*Raire*log(Patm/Patm);
sum_Ex4(i+1)=sum_Ex4(i)+mt*ex4(i)*dt;

i=i+1;
end
T_total=i/(3600)*dt;      %tiempo total del ciclo [h]
T_vac=T_total-T_llen;    %tiempo etapa expansion

Wcompresor=max(Wc)/10^6;  %energias de ciclo completo [GJ]
Ex2=max(sum_Ex2)/10^6;
Ex3=max(sum_Ex3)/10^6;
Wturbina=max(Wt)/10^6;
Ex4=max(sum_Ex4)/10^6;

Perd_compresor=Wcompresor-Ex2;
Perd_turbina=Ex3-Wturbina-Ex4;
Perd_deposito=Ex3-Ex2;

rend_CAES=Wturbina/Wcompresor;

rend_compresion=Ex2/Wcompresor;
rend_deposito=Ex3/Ex2;
rend_expansion=Wturbina/Ex3;

comprobacion_rendimientos=rend_CAES-
rend_compresion*rend_deposito*rend_expansion

Comprobacion_masadeposito=(Md(1)-Md(i))

%*****
% DIAGRAMAS Y RESULTADOS
%*****

T_llen
T_vac
T_total

Wcompresor
Ex2
Ex3
Wturbina
Ex4

Perd_compresor
Perd_turbina
Perd_deposito

rend_compresion
rend_deposito
rend_expansion

rend_CAES

%Temperaturas
T2=T2-273.15;
T4=T4-273.15;
Td=Td-273.15;
if edit
```



```
figure
hold on
plot((1:length(Td))/3600*dt,Td,'LineWidth',6,'color',[0 1 0])
plot((1:length(T2))/3600*dt,T2,'LineWidth',4,'color',[0 0 1])
plot((1:length(T4))/3600*dt,T4,'LineWidth',2,'color',[1 0 0])
legend('Td','T2','T4','Location','West')
axis([0 length(T3)/3600*dt+0.2 0 max([max(T2) max(Td) max(T4)])+50])
plot([T_llen T_llen+1/10^12],[0 max([max(T2) max(Td)
max(T4)])+20],'LineWidth',4,'Color',[0 0 0])
xlabel('time [hours]','fontsize',16)
ylabel('Temperatura [grados]','fontsize',16)
set(gca,'fontsize',16,'tickdir','out');
hold off
end
T2=T2+273.15;
T4=T4+273.15;
Td=Td+273.15;

%Presion en el deposito
Pd=Pd/10^2;
if edit
figure
hold on
plot((1:length(Pd))/3600*dt,Pd,'LineWidth',2,'color',[0 0 0])
plot([0 max(Pd)/3600*dt],[0 0],'LineWidth',4,'Color',[0 0 0])
axis([0 length(Pd)/3600*dt+0.2 min(Pd)-5 max(Pd)+5])
xlabel('time [hours]','fontsize',16)
ylabel('Presion [bares]','fontsize',16)
set(gca,'fontsize',16,'tickdir','out');
hold off
end
Pd=Pd*10^2;

%Energia en el deposito
Ed=Ed/10^6;
if edit
figure
hold on
plot((1:length(Ed))/3600*dt,Ed,'LineWidth',2,'color',[0 0 0])
plot([0 max(Ed)/3600*dt],[0 0],'LineWidth',4,'Color',[0 0 0])
axis([0 length(Ed)/3600*dt+0.2 min(Ed)-50 max(Ed)+50])
xlabel('time [hours]','fontsize',16)
ylabel('Energia deposito[GJ]','fontsize',16)
set(gca,'fontsize',16,'tickdir','out');
hold off
end
Ed=Ed*10^6;

%Potencia compresor y turbina
wc=wc/1000;
wt=wt/1000;
if edit
figure
hold on
plot((1:length(wc))/3600*dt,wc*mc,'LineWidth',2,'color',[0 0 1])
plot((1:length(wt))/3600*dt,wt*mt,'LineWidth',2,'color',[1 0 0])
legend('Compresor','Turbina','Location','NorthWest')
plot([T_llen T_llen+1/10^6],[0
max(wt*mt)+10],'LineWidth',4,'Color',[0 0 0])
plot([0 max(wc)/3600*dt],[0 0],'LineWidth',4,'Color',[0 0 0])
axis([0 length(wt)/3600*dt+0.2 1 max(wt*mt)+10])
```



```
xlabel('Tiempo [horas]','fontsize',16)
ylabel('Potencia [MW]','fontsize',16)
set(gca,'fontsize',16,'tickdir','out');
hold off
end
wc=wc*1000;
wt=wt*1000;

%*****
% DIAGRAMAS DE SANKEY
%*****

if editSankey
    %Etapa de expansion
    inputs = [Wcompresor];
    losses = [abs(Perd_compresor) ];
    unit = 'GJ';
    sep = [1,3];
    labels = {'Compresor','Perd','Entrada deposito'};

    drawSankey(inputs, losses, unit, labels, sep);

    %almacenamiento de aire
    inputs = [Ex2];
    losses = [abs(Perd_deposito)];
    unit = 'GJ';
    sep = [1,3];
    labels = {'Entrada deposito','Perd.','Salida deposito'};

    drawSankey(inputs, losses, unit, labels, sep);

    %Etapa de compresion
    inputs = [Ex3];
    losses = [abs(Perd_turbina) Ex4];
    unit = 'GJ';
    sep = [1,3];
    labels = {'Salida deposito','Perd','Escape','Turbina'};

    drawSankey(inputs, losses, unit, labels, sep);
end
```



Capítulo 2 SISTEMA CAES CONVENCIONAL

```
clear all %clear all the variables allocated in the
          %workspace
close all %close all the open figures

editfig=1; %if "edit"=0 no figures
editSankey=1; %if "edit"=1 show figures
editvar=1;

format longg

%*****
% CARACTERISTICAS DEL AIRE COMO GAS PERFECTO
%*****
gamma=1.4; %Exponente isentropico del aire [-]
MMaire=28.97; %Masa molar del aire[kg/kmol]
Raire=8.314472/MMaire; %Constante del aire
Cp=gamma*Raire/(gamma-1); %Calor especifico del aire [kJ/kg-K]
Cv=Raire/(gamma-1); %Calor especifico del aire [kJ/kg-K]

%*****
% PARAMETROS CONOCIDOS tomados de las caracteristicas de
% Huntford CAES plant
%*****

V=300000; %Volumen del deposito [m^3]
Pmax=72*10^2; % Presiones maxima y minima de trabajo
Pmin=46*10^2; % [kPa]

T1=15+273.15; %temperatura de entrada del aire[K]
Patm=101.325; %Presion de entrada del aire [kPa]

mt=417; %Gasto masico turbina [kg/s]
mc=108; %Gasto masico compresor [kg/s]

rend_compresor=0.85; % Rendimientos de la turbina y el compresor
rend_turbina=0.85; % [-]

%*****
%ITERACIONES PARA CALCULAR LA TEMPERATURA DEL DEPOSITO AL INICIO DEL
% CICLO
%*****
dt=0.5; %intervalos de tiempo en los que se integrara [s]

L=2; %Longitud minima vectores

n_iteraciones=0;
eps=10^-6; %precision que buscamos en la temperatura de entrada
```



```
in=1;

Tentrada=50+273.15; %Temperatura del deposito al inicio del ciclo

Tdin=50+273.15; %La temperatura de entrada en el deposito y la de la
T3=825+273.15; %entrada de la turbina deben ser mantenidas
constantes %a traves de la refrigeracion y de la camara de
%combustion [K]

i=2;

while in | (abs(Td(1)-Td(i))>eps & n_iteraciones<100)

% INICIALIZAMOS LAS VARIABLES PARA CADA NUEVA SIMULACION
%*****

wc=zeros(L,1); %Potencia especifica de compresion[kJ/kg]

qr=zeros(L,1); %Potencia refrigerada[kJ/kg]

Pd=zeros(L,1); %Presion en el deposito [kPa]
Md=zeros(L,1); %Masa de aire en el deposito[kg]
Ed=zeros(L,1); %Energia almacenada en el dep?sito [kJ]

qf=zeros(L,1); %Potencia camara de combustion[kJ/kg]

wt=zeros(L,1); %Potencia especifica de la turbina[kJ/kg]

T2=zeros(L,1); %Temperaturas [K]
Td=zeros(L,1);
Tdout=zeros(L,1);
T4=zeros(L,1);

% SIMULACION DE UN CICLO COMPLETO SIMPLE
%*****
Pd(1)=Pmin; %Presion inicial del deposito[K]
Td(1)=Tentrada; %Temperatura de entrada del
deposito[K]
Md(1)=Pd(1)*V/(Raire*Td(1));%Masa de aire inicial deposito[Kg]
Ed(1)=Td(1)*Md(1)*Cv; %Energia inicial en el deposito[kJ]

i=1;
while Pd(i)<Pmax
%modelado compresor
wc(i)=Cp*T1/rend_compresor*((Pd(i)/Patm)^((gamma-1)/gamma)-
1);

T2(i)=T1+wc(i)/Cp;

%modelado deposito
Md(i+1)=Md(i)+mc*dt;
Ed(i+1)=Ed(i)+mc*Cp*Tdin*dt;

%Estado del dep?sito
Td(i+1)=Ed(i+1)/(Md(i+1)*Cv);
```



```
Pd(i+1)=Md(i+1)*Raire*Td(i)/V;  
  
i=i+1;  
end  
  
while Pd(i)>Pmin  
  
Tdout(i)=Td(i);  
  
%modelado turbina  
wt(i)=Cp*T3*rend_turbina*(1-(Patm/Pd(i))^(gamma-1)/gamma));  
T4(i)=T3-wt(i)/Cp;  
  
%modelado deposito  
Md(i+1)=Md(i)-mt*dt;  
Ed(i+1)=Ed(i)-mt*Cp*Tdout(i)*dt;  
  
%Estado del dep?sito  
Td(i+1)=Ed(i+1)/(Md(i+1)*Cv);  
Pd(i+1)=Md(i+1)*Raire*Td(i)/V;  
  
i=i+1;  
end  
  
Tin=Td(1)-273.15;  
Tentrada=Td(i);  
  
n_iteraciones=n_iteraciones+1;  
  
in=0;  
end  
n_iteraciones
```

```
*****  
% VOLVEMOS A INICIALIZAR LAS VARIABLES PARA LA ULTIMA SIMULACION  
*****
```

```
wc=zeros(L,1); %Potencia especifica de compresion[kJ/kg]  
Wc=zeros(L,1); %Energia compresion[kJ]  
  
qr=zeros(L,1); %Potencia refrigerada[kJ/kg]  
Qr=zeros(L,1); %Energia perdida refrigeracion[kJ]  
  
Pd=zeros(L,1); %Presion en el deposito [kPa]  
Md=zeros(L,1); %Masa de aire en el deposito[kg]  
Ed=zeros(L,1); %Energia almacenada en el dep?sito [kJ]  
  
qf=zeros(L,1); %Potencia camara de combustion[kJ/kg]  
Qf=zeros(L,1); %Energia aportada por la combustion[kJ]  
  
wt=zeros(L,1); %Potencia especifica de la turbina[kJ/kg]  
Wt=zeros(L,1); %Energia turbina[kJ]  
  
%Inicializaci?n exergias de flujo[kJ/kg]  
ex2=zeros(L,1);  
sum_Ex2=zeros(L,1);  
  
T2din=zeros(L,1); %Temperatura media entropica refrigeracion[K]
```



```
sum_ExQr=zeros(L,1);

exdin=zeros(L,1);
sum_Exdin=zeros(L,1);

exd=zeros(L,1);
sum_Exd=zeros(L,1);

exdout=zeros(L,1);
sum_Exdout=zeros(L,1);

Tdout3=zeros(L,1);      %Temperatura media entropica combustion[K]
sum_ExQf=zeros(L,1);   %Exergia calor de combustion[kJ]

ex3=zeros(L,1);
sum_Ex3=zeros(L,1);

ex4=zeros(L,1);
sum_Ex4=zeros(L,1);

sum_pi=zeros(L,1);

T2=zeros(L,1);        %Temperaturas [K]
Td=zeros(L,1);
Tdout=zeros(L,1);
T4=zeros(L,1);

%*****
% SIMULACION CON LA TEMPERATURA DE DEPOSITO ADECUADA
%*****
Pd(1)=Pmin;           %Presion inicial del deposito[K]
Td(1)=Tentrada;      %Temperatura de entrada del deposito[K]
Md(1)=Pd(1)*V/(Raire*Td(1));%Masa de aire inicial deposito[Kg]
Ed(1)=Td(1)*Md(1)*Cv; %Energia inicial en el deposito[kJ]

i=1;
while Pd(i)<Pmax
    %modelado compresor
    wc(i)=Cp*T1/rend_compresor*((Pd(i)/Patm)^((gamma-1)/gamma)-1);
    T2(i)=T1+wc(i)/Cp;

    Wc(i+1)=Wc(i)+mc*wc(i)*dt;

    %Refrigeracion antes de la entrada en el deposito
    qr(i)=Cp*(T2(i)-Tdin);
    Qr(i+1)=Qr(i)+mc*qr(i)*dt;

    T2din(i)=(T2(i)-Tdin)/log(T2(i)/Tdin);
    sum_ExQr(i+1)=sum_ExQr(i)+mc*qr(i)*(1-T1/T2din(i))*dt;

    %modelado deposito
    Md(i+1)=Md(i)+mc*dt;
    Ed(i+1)=Ed(i)+mc*Cp*Tdin*dt;

    %Estado del deposito
    Td(i+1)=Ed(i+1)/(Md(i+1)*Cv);
    Pd(i+1)=Md(i+1)*Raire*Td(i)/V;

    %calculo de exergias
```



```
ex2(i)=Cp*(T2(i)-T1)-T1*Cp*log(T2(i)/T1)+T1*Raire*log(Pd(i)/Patm);
sum_Ex2(i+1)=sum_Ex2(i)+mc*ex2(i)*dt;

exdin(i)=Cp*(Tdin-T1)-T1*Cp*log(Tdin/T1)+T1*Raire*log(Pd(i)/Patm);
sum_Exdin(i+1)=sum_Exdin(i)+mc*exdin(i)*dt;

i=i+1;
end
T_llen=i/(3600)*dt; %tiempo etapa compresion [h]

Wt(i)=0;
Qf(i)=0;
sum_Exdout(i)=0;
sum_Ex3(i)=0;
sum_Ex4(i)=0;
sum_ExQf(i)=0;
sum_pi(i)=0;

while Pd(i)>Pmin

    Tdout(i)=Td(i);

    %modelado turbina
    wt(i)=Cp*T3*rend_turbina*(1-(Patm/Pd(i))^(gamma-1/gamma));
    T4(i)=T3-wt(i)/Cp;

    Wt(i+1)=Wt(i)+mt*wt(i)*dt;

    %camara de combustion
    qf(i)=Cp*(T3-Tdout(i));
    Qf(i+1)=Qf(i)+mt*qf(i)*dt;

    Tdout3(i)=(Tdout(i)-T3)/log(Tdout(i)/T3);
    sum_ExQf(i+1)=sum_ExQf(i)+mt*qf(i)*(1-T1/Tdout3(i))*dt;

    %modelado deposito
    Md(i+1)=Md(i)-mt*dt;
    Ed(i+1)=Ed(i)-mt*Cp*Tdout(i)*dt;

    %Estado del dep?sito
    Td(i+1)=Ed(i+1)/(Md(i+1)*Cv);
    Pd(i+1)=Md(i+1)*Raire*Td(i)/V;

    %calculo de exergias
    exdout(i)=Cp*(Tdout(i)-T1)-
    T1*Cp*log(Tdout(i)/T1)+T1*Raire*log(Pd(i)/Patm);
    sum_Exdout(i+1)=sum_Exdout(i)+mt*exdout(i)*dt;

    ex3(i)=Cp*(T3-T1)-T1*Cp*log(T3/T1)+T1*Raire*log(Pd(i)/Patm);
    sum_Ex3(i+1)=sum_Ex3(i)+mt*ex3(i)*dt;

    ex4(i)=Cp*(T4(i)-T1)-T1*Cp*log(T4(i)/T1)+T1*Raire*log(Patm/Patm);
    sum_Ex4(i+1)=sum_Ex4(i)+mt*ex4(i)*dt;

    %calculo del termino corrector
    sum_pi(i+1)=sum_pi(i)+wt(i)/ex3(i)*dt;

    i=i+1;
end
T_total=i/(3600)*dt; %tiempo total del ciclo [h]
T_vac=T_total-T_llen; %tiempo etapa expansion [h]
```



```
Qrefr=max(Qr)/10^6;

Qcomb=max(Qf)/10^6;

Wcompresor=max(Wc)/10^6;    %energias de ciclo completo [GJ]
Ex2=max(sum_Ex2)/10^6;
Exrefr=max(sum_ExQr)/10^6;
Exdin=max(sum_Exdin)/10^6;
Exdout=max(sum_Exdout)/10^6;
Excomb=max(sum_ExQf)/10^6;
Ex3=max(sum_Ex3)/10^6;
Wturbina=max(Wt)/10^6;
Ex4=max(sum_Ex4)/10^6;

pi=max(sum_pi)/(T_vac*3600);

Perd_compresor=Wcompresor-Exrefr-Exdin;
Perd_turbina=Ex3-Wturbina-Ex4;
Perd_deposito=Exdin-Exdout;

rend_comp=Exdin/Wcompresor*100;
rend_dep=(Exdout/Exdin)*100;
rend_exp=(Wturbina-pi*Excomb)/Exdout*100;

rend_caes=rend_comp*rend_dep*rend_exp/10^4;

Td_max=max(Td)-273.15;
Td_min=min(Td)-273.15;

%*****
% RESULTADOS
%*****
if editvar

    dt
    eps

    comprobacion_compresion=Ex2-Exrefr-Exdin
    comprobacion_expansion=Ex3-Exdout-Excomb

    Perd_compresor
    Perd_turbina
    Perd_deposito

    Tmax_deposito=max(Td)-273.15;
    Tmin_deposito=min(Td)-273.15;

    Qrefr
    Qcomb

    T_llen
    T_vac
    T_total

    Wcompresor
    Ex2
    Exrefr
    Exdin
```



```
Exdout
Excomb
Ex3
Wturbina
Ex4

Td_max
Td_min

pi

rend_comp
rend_dep
rend_exp

rend_caes
end

%*****
% FIGURAS
%*****

%Temperaturas
T2=T2-273.15;
Td=Td-273.15;
T4=T4-273.15;
Tdin=Tdin-273.15;
T3=T3-273.15;
if editfig
    figure
    hold on
    plot((1:length(Td))/3600*dt,Td,'LineWidth',4,'color',[0 1 0])
    plot((1:length(T2))/3600*dt,T2,'LineWidth',2,'color',[0 0 1])
    plot((1:length(T4))/3600*dt,T4,'LineWidth',2,'color',[1 0 0])
    plot([0 T_llen],[Tdin Tdin],'LineWidth',1,'color',[0 0 0])
    plot([T_llen length(Td)/3600*dt+0.2],[T3 T3],'LineWidth',1,'color',[0
0 0])
    legend('Td','T2','T4','Tdin','T3','Location','West')
    plot([0 length(Td)/3600*dt+0.2],[0 0],'LineWidth',4,'Color',[0 0 0])
    plot([T_llen T_llen+1/10^6],[0 max([max(T2) T3 max(Td) max(Tdout)
max(T4)])+20],'LineWidth',4,'Color',[0 0 0])
    axis([0 length(Td)/3600*dt+0.2 0 max([max(T2) T3 max(Td) max(Tdout)
max(T4)])+20])
    xlabel('time [hours]','fontsize',16)
    ylabel('Temperatura [grados]','fontsize',16)
    set(gca,'fontsize',16,'tickdir','out');
    hold off
end
T2=T2+273.15;
Td=Td+273.15;
T4=T4+273.15;
Tdin=Tdin+273.15;
T3=T3+273.15;

%Presion en el deposito
Pd=Pd/10^2;
if editfig
    figure
    hold on
    plot((1:length(Pd))/3600*dt,Pd,'LineWidth',2,'color',[0 0 0])
```



```
plot([0 max(Pd)/3600*dt],[0 0], 'LineWidth',4, 'Color',[0 0 0])
axis([0 length(Pd)/3600*dt+0.2 min(Pd)-5 max(Pd)+5])
xlabel('time [hours]', 'fontsize',16)
ylabel('Presion [bares]', 'fontsize',16)
set(gca, 'fontsize',16, 'tickdir', 'out');
hold off
end
Pd=Pd*10^2;

%Energia en el deposito
Ed=Ed/10^6;
if editfig
    figure
    hold on
    plot((1:length(Ed))/3600*dt,Ed, 'LineWidth',2, 'color',[0 0 0])
    plot([0 max(Ed)/3600*dt],[0 0], 'LineWidth',4, 'Color',[0 0 0])
    axis([0 length(Ed)/3600*dt+0.2 min(Ed)-50 max(Ed)+50])
    xlabel('time [hours]', 'fontsize',16)
    ylabel('Energia deposito[GJ]', 'fontsize',16)
    set(gca, 'fontsize',16, 'tickdir', 'out');
    hold off
end
Ed=Ed*10^6;

%Masa en el deposito
Md=Md/10^6;
if editfig
    figure
    hold on
    plot((1:length(Md))/3600*dt,Md, 'LineWidth',2, 'color',[0 0 0])
    plot([0 max(Md)/3600*dt],[0 0], 'LineWidth',4, 'Color',[0 0 0])
    axis([0 length(Md)/3600*dt+0.2 min(Md)-1 max(Md)+1])
    xlabel('time [hours]', 'fontsize',16)
    ylabel('Masa aire deposito[10^6Kg]', 'fontsize',16)
    set(gca, 'fontsize',16, 'tickdir', 'out');
    hold off
end
Md=Md*10^6;

%Potencia compresor y turbina
wc=wc/1000;
wt=wt/1000;
if editfig
    figure
    hold on
    plot((1:length(wc))/3600*dt,wc*mc, 'LineWidth',2, 'color',[0 0 1])
    plot((1:length(wt))/3600*dt,wt*mt, 'LineWidth',2, 'color',[1 0 0])
    legend('Compresor', 'Turbina', 'Location', 'NorthWest')
    plot([T_llen T_llen+1/10^6],[0
max(wt*mt)+10], 'LineWidth',4, 'Color',[0 0 0])
    plot([0 max(wc)/3600*dt],[0 0], 'LineWidth',4, 'Color',[0 0 0])
    axis([0 length(wt)/3600*dt+0.2 0 max(wt*mt)+10])
    xlabel('Tiempo [horas]', 'fontsize',16)
    ylabel('Potencia [MW]', 'fontsize',16)
    set(gca, 'fontsize',16, 'tickdir', 'out');
    hold off
end
wc=wc*1000;
wt=wt*1000;
```



```
%*****  
% DIAGRAMAS DE SANKEY  
%*****  
  
if editSankey  
    %Etapa de expansion  
    inputs = [Wcompresor];  
    losses = [Perd_compresor+10^-6 Exrefr];  
    unit = 'GJ';  
    sep = [1,3];  
    labels = {'Compresor','Perd.','Refr.','Entrada deposito'};  
  
    drawSankey(inputs, losses, unit, labels, sep);  
  
    %almacenamiento de aire  
    inputs = [Exdin];  
    losses = [Perd_deposito+10^-6];  
    unit = 'GJ';  
    sep = [1,3];  
    labels = {'Entrada deposito','Perd.','Salida deposito'};  
  
    drawSankey(inputs, losses, unit, labels, sep);  
  
    %Etapa de compresion  
    inputs = [Exdout Excomb];  
    losses = [Perd_turbina+10^-6 Ex4];  
    unit = 'GJ';  
    sep = [1,3];  
    labels = {'Salida  
deposito','Combustion','Perd.','Escape','Turbina'};  
  
    drawSankey(inputs, losses, unit, labels, sep);  
  
end
```



Capítulo 3 SISTEMA CAES ADIABÁTICO

```
clear all %clear all the variables allocated in the
          %workspace
close all %close all the open figures

editfig=1; %if "edit"=0 no figures
editSankey=1; %if "edit"=1 show figures
editvar=1;

format longg

%*****
% CARACTERISTICAS DEL AIRE COMO GAS PERFECTO
%*****
gamma=1.4; %Exponente isentropico del aire [-]
MMaire=28.97; %Masa molar del aire[kg/kmol]
Raire=8.314472/MMaire; %Constante del aire
Cp=gamma*Raire/(gamma-1); %Calor especifico del aire [kJ/kg-K]
Cv=Raire/(gamma-1); %Calor especifico del aire [kJ/kg-K]

%*****
% PARAMETROS CONOCIDOS tomados de las características de
% Huntford CAES plant
%*****

V=300000; %Volumen del deposito [m^3]
Pmax=72*10^2; % Presiones maxima y minima de trabajo
Pmin=46*10^2; % [kPa]

T1=15+273.15; %temperatura de entrada del aire[K]
Patm=101.325; %Presion de entrada del aire [kPa]

mt=417; %Gasto masico turbina [kg/s]
mc=108; %Gasto masico compresor [kg/s]

rend_compresor=0.8; % Rendimientos de la turbina y el compresor
rend_turbina=0.85; % [-]

rend_acumulador=0.6; %rendimiento del acumulador
%*****
%ITERACIONES PARA CALCULAR LA TEMPERATURA DEL DEPOSITO AL INICIO DEL
% CICLO
%*****
dt=0.5; %intervalos de tiempo en los que se integrara [s]

L=2; %Longitud minima vectores

n_iteraciones=0;
eps=10^-6; %precision que buscamos en la temperatura de entrada
```



```
in=1;

Tentrada=50+273.15; %Temperatura del deposito al inicio del ciclo

Tdin=50+273.15;      %La temperatura de entrada en el deposito y la de la
T3=825+273.15;      %entrada de la turbina deben ser mantenidas
constantes          %a traves de la refrigeracion y de la camara de
                    %combustion [K]

i=2;

while in | (abs(Td(1)-Td(i))>eps & n_iteraciones<100)

    % INICIALIZAMOS LAS VARIABLES PARA CADA NUEVA SIMULACION
    %*****

    wc=zeros(L,1);    %Potencia especifica de compresion[kJ/kg]

    qr=zeros(L,1);    %Potencia refrigerada[kJ/kg]
    qrr=zeros(L,1);   %Potencia calor?fica recuperada[kJ/kg]

    Pd=zeros(L,1);    %Presion en el deposito [kPa]
    Md=zeros(L,1);    %Masa de aire en el deposito[kg]
    Ed=zeros(L,1);    %Energia almacenada en el deposito [kJ]

    qf=zeros(L,1);    %Potencia camara de combustion[kJ/kg]

    wt=zeros(L,1);    %Potencia especifica de la turbina[kJ/kg]

    T2=zeros(L,1);    %Temperaturas [K]
    Td=zeros(L,1);
    Tdout=zeros(L,1);
    T4=zeros(L,1);

    % SIMULACION DE UN CICLO COMPLETO SIMPLE
    %*****
    Pd(1)=Pmin;        %Presion inicial del deposito[K]
    Td(1)=Tentrada;    %Temperatura de entrada del
deposito[K]
    Md(1)=Pd(1)*V/(Raire*Td(1));%Masa de aire inicial deposito[Kg]
    Ed(1)=Td(1)*Md(1)*Cv; %Energia inicial en el deposito[kJ]

    i=1;
    while Pd(i)<Pmax
        %modelado compresor
        wc(i)=Cp*T1/rend_compresor*((Pd(i)/Patm)^((gamma-1)/gamma)-
1);
        T2(i)=T1+wc(i)/Cp;

        %modelado deposito
        Md(i+1)=Md(i)+mc*dt;
        Ed(i+1)=Ed(i)+mc*Cp*Tdin*dt;
    end
end
```



```
%Estado del dep?sito
Td(i+1)=Ed(i+1)/(Md(i+1)*Cv);
Pd(i+1)=Md(i+1)*Raire*Td(i)/V;

i=i+1;
end

while Pd(i)>Pmin

    Tdout(i)=Td(i);

    %modelado turbina
    wt(i)=Cp*T3*rend_turbina*(1-(Patm/Pd(i))^((gamma-1)/gamma));
    T4(i)=T3-wt(i)/Cp;

    %modelado deposito
    Md(i+1)=Md(i)-mt*dt;
    Ed(i+1)=Ed(i)-mt*Cp*Tdout(i)*dt;

    %Estado del dep?sito
    Td(i+1)=Ed(i+1)/(Md(i+1)*Cv);
    Pd(i+1)=Md(i+1)*Raire*Td(i)/V;

    i=i+1;
end

Tin=Td(1)-273.15;
Tentrada=Td(i);

n_iteraciones=n_iteraciones+1;

in=0;
end
n_iteraciones

%*****
% VOLVEMOS A INICIALIZAR LAS VARIABLES PARA LA ULTIMA SIMULACION
%*****

wc=zeros(L,1); %Potencia especifica de compresion[kJ/kg]
Wc=zeros(L,1); %Energia compresi?n[kJ]

qr=zeros(L,1); %Potencia refrigerada[kJ/kg]
Qr=zeros(L,1); %Energia perdida refrigeracion[kJ]
qrr=zeros(L,1); %Potencia recuperada[kJ/kg]
Qrr=zeros(L,1); %Energia recuperada[kJ]

Pd=zeros(L,1); %Presion en el deposito [kPa]
Md=zeros(L,1); %Masa de aire en el deposito[kg]
Ed=zeros(L,1); %Energia almacenada en el dep?sito [kJ]

qf=zeros(L,1); %Potencia camara de combustion[kJ/kg]
Qf=zeros(L,1); %Energia aportada por la combustion[kJ]

wt=zeros(L,1); %Potencia especifica de la turbina[kJ/kg]
Wt=zeros(L,1); %Energia turbina[kJ]
```



```
%Inicializaci?n exergias de flujo[kJ/kg]
ex2=zeros(L,1);
sum_Ex2=zeros(L,1);

T2din=zeros(L,1); %Temperatura media entropica refrigeracion[K]
sum_ExQr=zeros(L,1);

exdin=zeros(L,1);
sum_Exdin=zeros(L,1);

exd=zeros(L,1);
sum_Exd=zeros(L,1);

exdout=zeros(L,1);
sum_Exdout=zeros(L,1);

Tdout3=zeros(L,1); %Temperatura media entropica combustion[K]
sum_ExQf=zeros(L,1); %Exergia calor de combustion[kJ]

ex3=zeros(L,1);
sum_Ex3=zeros(L,1);

ex4=zeros(L,1);
sum_Ex4=zeros(L,1);

sum_pi=zeros(L,1);

T2=zeros(L,1); %Temperaturas [K]
Td=zeros(L,1);
Tdout=zeros(L,1);
T4=zeros(L,1);

%*****
% SIMULACION CON LA TEMPERATURA DE DEPOSITO ADECUADA
%*****
Pd(1)=Pmin; %Presion inicial del deposito[K]
Td(1)=Tentrada; %Temperatura de entrada del deposito[K]
Md(1)=Pd(1)*V/(Raire*Td(1)); %Masa de aire inicial deposito[Kg]
Ed(1)=Td(1)*Md(1)*Cv; %Energia inicial en el deposito[kJ]

i=1;
while Pd(i)<Pmax
    %modelado compresor
    wc(i)=Cp*T1/rend_compresor*((Pd(i)/Patm)^(gamma-1)/gamma)-1;
    T2(i)=T1+wc(i)/Cp;

    Wc(i+1)=Wc(i)+mc*wc(i)*dt;

    %Refrigeracion antes de la entrada en el deposito
    qr(i)=Cp*(T2(i)-Tdin);
    Qr(i+1)=Qr(i)+mc*qr(i)*dt;

    T2din(i)=(T2(i)-Tdin)/log(T2(i)/Tdin);
    sum_ExQr(i+1)=sum_ExQr(i)+mc*qr(i)*(1-T1/T2din(i))*dt;

    %modelado deposito
    Md(i+1)=Md(i)+mc*dt;
    Ed(i+1)=Ed(i)+mc*Cp*Tdin*dt;
```



```
%Estado del deposito
Td(i+1)=Ed(i+1)/(Md(i+1)*Cv);
Pd(i+1)=Md(i+1)*Raire*Td(i)/V;

%calculo de exergias
ex2(i)=Cp*(T2(i)-T1)-T1*Cp*log(T2(i)/T1)+T1*Raire*log(Pd(i)/Patm);
sum_Ex2(i+1)=sum_Ex2(i)+mc*ex2(i)*dt;

exdin(i)=Cp*(Tdin-T1)-T1*Cp*log(Tdin/T1)+T1*Raire*log(Pd(i)/Patm);
sum_Exdin(i+1)=sum_Exdin(i)+mc*exdin(i)*dt;

i=i+1;
end
T_llen=i/(3600)*dt; %tiempo etapa compresion [h]

Wt(i)=0;
Qf(i)=0;
sum_Exdout(i)=0;
sum_Ex3(i)=0;
sum_Ex4(i)=0;
sum_ExQf(i)=0;
sum_pi(i)=0;

while Pd(i)>Pmin

    Tdout(i)=Td(i);

    %modelado turbina
    wt(i)=Cp*T3*rend_turbina*(1-(Patm/Pd(i))^(gamma-1)/gamma);
    T4(i)=T3-wt(i)/Cp;

    Wt(i+1)=Wt(i)+mt*wt(i)*dt;

    %camara de combustion
    qf(i)=Cp*(T3-Tdout(i));
    Qf(i+1)=Qf(i)+mt*qf(i)*dt;

    Tdout3(i)=(Tdout(i)-T3)/log(Tdout(i)/T3);
    sum_ExQf(i+1)=sum_ExQf(i)+mt*qf(i)*(1-T1/Tdout3(i))*dt;

    %modelado deposito
    Md(i+1)=Md(i)-mt*dt;
    Ed(i+1)=Ed(i)-mt*Cp*Tdout(i)*dt;

    %Estado del dep?sito
    Td(i+1)=Ed(i+1)/(Md(i+1)*Cv);
    Pd(i+1)=Md(i+1)*Raire*Td(i)/V;

    %calculo de exergias
    exdout(i)=Cp*(Tdout(i)-T1)-
    T1*Cp*log(Tdout(i)/T1)+T1*Raire*log(Pd(i)/Patm);
    sum_Exdout(i+1)=sum_Exdout(i)+mt*exdout(i)*dt;

    ex3(i)=Cp*(T3-T1)-T1*Cp*log(T3/T1)+T1*Raire*log(Pd(i)/Patm);
    sum_Ex3(i+1)=sum_Ex3(i)+mt*ex3(i)*dt;

    ex4(i)=Cp*(T4(i)-T1)-T1*Cp*log(T4(i)/T1)+T1*Raire*log(Patm/Patm);
    sum_Ex4(i+1)=sum_Ex4(i)+mt*ex4(i)*dt;

    %calculo del termino corrector
    sum_pi(i+1)=sum_pi(i)+wt(i)/ex3(i)*dt;
```



```
i=i+1;
end
T_total=i/(3600)*dt;      %tiempo total del ciclo [h]
T_vac=T_total-T_llen;    %tiempo etapa expansion [h]

Qrefr=max(Qr)/10^6;

Qcomb=max(Qf)/10^6;

Wcompresor=max(Wc)/10^6; %energias de ciclo completo [GJ]
Ex2=max(sum_Ex2)/10^6;
Exrefr=max(sum_ExQr)/10^6;
Exdin=max(sum_Exdin)/10^6;
Exdout=max(sum_Exdout)/10^6;
Excomb=max(sum_ExQf)/10^6;
Ex3=max(sum_Ex3)/10^6;
Wturbina=max(Wt)/10^6;
Ex4=max(sum_Ex4)/10^6;

pi=max(sum_pi)/(T_vac*3600);

Perd_compresor=Wcompresor-Exrefr-Exdin;
Perd_turbina=Ex3-Wturbina-Ex4;
Perd_deposito=Exdin-Exdout;

Td_max=max(Td)-273.15;
Td_min=min(Td)-273.15;

Exrec=rend_acumulador*Exrefr;
Exrefr=Exrefr-Exrec;
Excomb=Excomb-Exrec;

rend_comp=(Exdin+Exrec)/Wcompresor*100;
rend_dep=(Exdout/Exdin)*100;
rend_exp=(Wturbina-pi*Excomb)/(Exdout+Exrec)*100;

rend_caes=rend_comp*rend_dep*rend_exp/10^4;

%*****
% FIGURAS
%*****

%Temperaturas
T2=T2-273.15;
Td=Td-273.15;
T4=T4-273.15;
Tdin=Tdin-273.15;
T3=T3-273.15;
if editfig
    figure
    hold on
    plot((1:length(Td))/3600*dt,Td,'LineWidth',4,'color',[0 1 0])
    plot((1:length(T2))/3600*dt,T2,'LineWidth',2,'color',[0 0 1])
    plot((1:length(T4))/3600*dt,T4,'LineWidth',2,'color',[1 0 0])
    plot([0 T_llen],[Tdin Tdin],'LineWidth',1,'color',[0 0 0])
    plot([T_llen length(Td)/3600*dt+0.2],[T3 T3],'LineWidth',1,'color',[0
0 0])
    legend('Td','T2','T4','Tdin','T3','Location','West')
```



```
plot([0 length(Td)/3600*dt+0.2],[0 0], 'LineWidth',4, 'Color',[0 0 0])
plot([T_llen T_llen+1/10^6],[0 max([max(T2) T3 max(Td) max(Tdout)
max(T4)])+20], 'LineWidth',4, 'Color',[0 0 0])
axis([0 length(Td)/3600*dt+0.2 0 max([max(T2) T3 max(Td) max(Tdout)
max(T4)])+20])
xlabel('time [hours]','fontsize',16)
ylabel('Temperatura [grados]','fontsize',16)
set(gca, 'fontsize',16, 'tickdir', 'out');
hold off
end
T2=T2+273.15;
Td=Td+273.15;
T4=T4+273.15;
Tdin=Tdin+273.15;
T3=T3+273.15;

%Presion en el deposito
Pd=Pd/10^2;
if editfig
figure
hold on
plot((1:length(Pd))/3600*dt,Pd, 'LineWidth',2, 'color',[0 0 0])
plot([0 max(Pd)/3600*dt],[0 0], 'LineWidth',4, 'Color',[0 0 0])
axis([0 length(Pd)/3600*dt+0.2 min(Pd)-5 max(Pd)+5])
xlabel('time [hours]','fontsize',16)
ylabel('Presion [bares]','fontsize',16)
set(gca, 'fontsize',16, 'tickdir', 'out');
hold off
end
Pd=Pd*10^2;

%Energia en el deposito
Ed=Ed/10^6;
if editfig
figure
hold on
plot((1:length(Ed))/3600*dt,Ed, 'LineWidth',2, 'color',[0 0 0])
plot([0 max(Ed)/3600*dt],[0 0], 'LineWidth',4, 'Color',[0 0 0])
axis([0 length(Ed)/3600*dt+0.2 min(Ed)-50 max(Ed)+50])
xlabel('time [hours]','fontsize',16)
ylabel('Energia deposito[GJ]','fontsize',16)
set(gca, 'fontsize',16, 'tickdir', 'out');
hold off
end
Ed=Ed*10^6;

%Masa en el deposito
Md=Md/10^6;
if editfig
figure
hold on
plot((1:length(Md))/3600*dt,Md, 'LineWidth',2, 'color',[0 0 0])
plot([0 max(Md)/3600*dt],[0 0], 'LineWidth',4, 'Color',[0 0 0])
axis([0 length(Md)/3600*dt+0.2 min(Md)-1 max(Md)+1])
xlabel('time [hours]','fontsize',16)
ylabel('Masa aire deposito[10^6Kg]','fontsize',16)
set(gca, 'fontsize',16, 'tickdir', 'out');
hold off
end
Md=Md*10^6;
```



```
%Potencia compresor y turbina
wc=wc/1000;
wt=wt/1000;
if editfig
    figure
    hold on
    plot((1:length(wc))/3600*dt,wc*mc,'LineWidth',2,'color',[0 0 1])
    plot((1:length(wt))/3600*dt,wt*mt,'LineWidth',2,'color',[1 0 0])
    legend('Compresor','Turbina','Location','NorthWest')
    plot([T_lflen T_lflen+1/10^6],[0
max(wt*mt)+10],'LineWidth',4,'Color',[0 0 0])
    plot([0 max(wc)/3600*dt],[0 0],'LineWidth',4,'Color',[0 0 0])
    axis([0 length(wt)/3600*dt+0.2 0 max(wt*mt)+10])
    xlabel('Tiempo [horas]','fontsize',16)
    ylabel('Potencia [MW]','fontsize',16)
    set(gca,'fontsize',16,'tickdir','out');
    hold off
end
wc=wc*1000;
wt=wt*1000;

%*****
% DIAGRAMAS DE SANKEY Adiabatic CAES
%*****

if editSankey
    %Etapa de expansion
    inputs = [Wcompresor];
    losses = [Perd_compresor+10^-6 Exrefr Exrec];
    unit = 'GJ';
    sep = [1,3];
    labels = {'Compresor','Perd.','Refr.','Rec.','Entrada deposito'};

    drawSankey(inputs, losses, unit, labels, sep);

    %almacenamiento de aire
    inputs = [Exdin];
    losses = [Perd_deposito+10^-6];
    unit = 'GJ';
    sep = [1,3];
    labels = {'Entrada deposito','Perd.','Salida deposito'};

    drawSankey(inputs, losses, unit, labels, sep);

    %Etapa de compresion
    inputs = [Exdout Exrec Excomb];
    losses = [Perd_turbina+10^-6 Ex4];
    unit = 'GJ';
    sep = [1,3];
    labels = {'Salida deposito','Calor
recuperado','Combustion','Perd.','Escape','Turbina'};

    drawSankey(inputs, losses, unit, labels, sep);
end
```