

Comparación de los métodos de almacenamiento de energía mediante aire comprimido

(CAES, compressed air energy storage)

Hernán Darío Contreras Romero

Camilo Ernesto Prieto Manosalva

Trabajo de Grado para otorgar el título de Ingeniero Electricista

Director

Hermann Raúl Vargas Torres

Doctor en Ingeniería Eléctrica

Codirector

Rodrigo Correa Celis

Doctor en Ciencia e Ingeniería de Polímeros

Universidad Industrial De Santander

Facultad De Ingenierías Físico-mecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2017

Contenido

	Pág.
Introducción	16
1. Objetivos.....	18
1.1 Objetivo general.....	18
1.2 Objetivos específicos.....	18
2. Presentación del trabajo de grado	19
3. Estado del arte.....	19
3.1 Tipos de tecnología.....	20
3.1.1 CAES Convencional	20
3.1.2 CAES Adiabático.....	24
3.1.3 CAES Isotérmico	27
4. Fundamento teórico	30
5. Simulación	48
5.1 Parámetros de simulación	49
5.2 Simulación caes convencional	53
5.2.1 Parámetros iniciales	54
5.2.2 Resultados	54
5.3 <i>Simulación caes adiabático</i>	59
5.3.1 Parámetros iniciales	60
5.3.2 Resultados.....	61

5.4 Modelos caes isotérmico..... 65

5.4.1 Parámetros iniciales. 66

5.4.2 Resultados 67

5.5 Comparación 70

6. Observaciones y conclusiones 73

Bibliografía 75

Apéndices..... 79

Lista de figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Turbina con sistema de recuperación de calor.....	22
<i>Figura 2.</i> Modelo de una planta CAES convencional	23
<i>Figura 3.</i> Esquema planta caes adiabático.....	27
<i>Figura 4.</i> Esquema planta caes isotérmico	29
<i>Figura 5.</i> Esquema planta CAES convencional.	30
<i>Figura 6.</i> Compresor.....	32
<i>Figura 7.</i> Tren de compresión	36
<i>Figura 8.</i> Intercambiador de calor	37
<i>Figura 9.</i> Turbina de gas.....	43
<i>Figura 10.</i> Modelo CAES convencional	53
<i>Figura 11.</i> Esquema balance exergético CAES convencional (valores en MJ)	57
<i>Figura 12.</i> Variación de la temperatura y la presión en el llenado del tanque	59
<i>Figura 13.</i> Modelo CAES adiabático	60
<i>Figura 14.</i> Esquema balance exergético CAES adiabático (valores en MJ)	63
<i>Figura 15.</i> Esquema CAES isotérmico.....	66
<i>Figura 16.</i> Esquema balance exergético CAES Isotérmico (valores en MJ)	69
<i>Figura 17.</i> Curva de demanda diaria en España	72

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Parámetros del gas ideal.</i>	49
Tabla 2. <i>Materiales</i>	51
Tabla 3. <i>Características del tanque de almacenamiento</i>	52
Tabla 4. <i>Variación de flujo y tiempo</i>	52
Tabla 5. <i>Condiciones de entrada</i>	54
Tabla 6. <i>Duración ciclo</i>	55
Tabla 7. <i>Temperaturas</i>	55
Tabla 8. <i>Potencia</i>	56
Tabla 9. <i>Balance exergético.</i>	57
Tabla 10. <i>Condiciones de entrada</i>	60
Tabla 11. <i>Duración ciclo.</i>	61
Tabla 12. <i>Temperatura.</i>	62
Tabla 13. <i>Potencia.</i>	62
Tabla 14. <i>Balance exergético.</i>	64
Tabla 15. <i>Comparación eficiencias almacenador térmico</i>	65
Tabla 16. <i>Condiciones de entrada</i>	66
Tabla 17. <i>Tiempo</i>	67
Tabla 18. <i>Temperaturas y eficiencia</i>	68
Tabla 19. <i>Potencias</i>	68

Tabla 20. <i>Balance exergético</i>	69
Tabla 21. <i>Comparación de los tres sistemas</i>	70
Tabla 22. <i>Eficiencias por etapas</i>	71
Tabla 23. <i>Comparación de precios en horas valles y pico</i>	72

Lista de apéndices

	Pág.
Apéndice A. Resultados de simulación	79
Apéndice B. Manual de usuario.....	89

Nomenclatura

c	Calor específico, $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$
c_p	Calor específico a presión constante, $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$
c_v	Calor específico a volumen constante, $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$
e	Energía total específica, kJ/kg
E	Energía total, kJ
ec	Energía cinética específica, $V^2/2$, kJ/kg
EC	Energía cinética total, $mV^2/2$, kJ
ep	Energía potencial específica, gz , kJ/kg
EP	Energía potencial total, mgz , kJ
h	Entalpía específica, $u + Pv$, kJ/kg
H	Entalpía total, $U + PV$, kJ
i	Irreversibilidad específica, kJ/kg
I	Irreversibilidad
K	Relación de calores específicos, c_p/c_v
M	Masa, kg
\dot{m}	Tasa de flujo de masa, kg/s
n	Exponente politrópico
P	Presión, kPa
P_{cr}	Presión crítica, kPa
P_i	Presión parcial, kPa
P_r	Presión relativa, kPa

P_o	Presión ambiente, kPa
q	Transferencia de calor por unidad de masa, kJ/kg
Q	Transferencia tota de calor, kJ/kg
\dot{Q}	Tasa de transferencia tota de calor, kJ/kg
R	Constante de gas, kJ/kg · K
s	Entropía específica, kJ/kg · K
S	Entropía total, kJ/K
t	Tiempo, s
T	Temperatura, °C o K
T_0	Temperatura ambiente, °C o K
u	Energía interna específica, kJ/kg
U	Energía interna total, kJ
V	Volumen total, m^3
w	Trabajo por unidad de masa, kJ/kg
W	Trabajo total, kJ
\dot{W}	potencia, kW
W_{ent}	Trabajo consumido, kJ
W_{sal}	Trabajo producido, kJ
W_{rev}	Trabajo reversible, kJ

Letras griegas

Δ	Cambio finito de cantidad
η_{ter}	Eficiencia térmica

η	Eficiencia
θ	Energía total de un flujo en movimiento, kJ/kg
ρ	Densidad, kg/m ³
Φ	Exergía específica de sistema cerrado, kJ/kg
Φ	Exergía total de sistema cerrado, Kj
ψ	Exergía de corriente, kJ/kg

Subíndices

abs Absoluto

real Real

atm Atmosfera

entrada Condiciones a la entrada

salida Condiciones de salida

sis Sistema

VC Volumen de control

0 Estado muerto

1 Estado inicial

2 Estado final

Resumen

TITULO: Comparación de los métodos de almacenamiento de energía mediante aire comprimido (CAES, compressed air energy storage).*

AUTORES: Camilo Ernesto Prieto Manosalva **
Hernán Darío Contreras Romero

PALABRAS CLAVE: CAES, Adiabático, Isotérmico, almacenamiento, MATLAB, modelo, compresión, expansión, energía, exergía, potencia.

DESCRIPCIÓN

El presente trabajo trata de los sistemas de almacenamiento mediante aire comprimido CAES. Para realizarlo, se llevó a cabo el estado del arte de los CAES, resaltando las diferentes tipologías existentes y las características más sobresalientes. Comprendiendo así los CAES como sistemas que consiste principalmente en comprimir y luego almacenar aire en depósitos a altas presiones, para luego liberarlo por medio de turbinas, y generar electricidad en los momentos que se lo requiera. Este proceso combina principios termodinámicos, que permitieron hacer un análisis más detallado de dichos sistemas, y mediante la herramienta de programación como MATLAB, se diseñaron modelos de simulación para los CAES tradicional, adiabático e isotérmico. En cuanto al desarrollo de los programas, se implementó un modelo que integraba las etapas de compresión, almacenamiento y expansión; se programó un proceso iterativo donde se buscaron los parámetros iniciales del sistema, para luego simular el ciclo completo, logrando así, obtener resultados de temperatura, presión, eficiencia, exergía, energía, potencias, pérdidas y tiempo de duración de los ciclos, para un tanque con volumen fijo y valores determinados de flujos de aire en la turbina y el compresor. Lo que finalmente permitió la comparación de los sistemas CAES resaltando las características más favorables de operación de cada sistema.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas; Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones;
Director: DR. Hermann Raúl Vargas Torres, Doctor en Ingeniería Eléctrica. Codirector: PhD. Rodrigo Correa Celis,
Doctor en Ciencia e Ingeniería de Polímeros

Abstract

TITLE: Comparison of methods for energy storage using compressed air (CAES, compressed air energy storage).*

AUTHORS: Camilo Ernesto Prieto Manosalva **
Hernán Darío Contreras Romero.

KEYWORDS: CAES, adiabatic, isothermal, storage, MATLAB, model-pattern, compression, expansion, energy, exergy, power.

DESCRIPTION

The present work tries to show the characteristics and the benefits of the systems of storage by means of compressed air CAES. To do this, a review of the state of the art of CAES was carried out, highlighting the different typologies and the most outstanding characteristics. Understanding CAES as systems that consume mainly in compressing and then storing air in deposits at high pressures, then release by means of turbines, and generate electricity in the moments that require it. This process combines thermodynamic principles, which allowed for a more detailed analysis of the systems of the paragraphs, and using the MATLAB programming tool, the simulation models for traditional, additive and isothermal CAES were designed. As for the development of the simulation models, a model was implemented that integrated the stages of compression, storage and expansion; It is programmed in an iterative process where the initial parameters of the system are searched, to simulate the complete cycle, thus obtaining results of temperature, pressure, efficiency, exergy, energy, power, losses and cycle time. A Tank with fixed volume and determined values of the air flows in the turbine and the compressor. This finally allowed the comparison of CAES systems highlighting the most favorable characteristics of the operation of each system.

* Work Degree in Research Mode

** Faculty of Physicomechanical Engineering; School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering; Director: DR. Hermann Raúl Vargas Torres, PhD in Electrical Engineering. Co-director: PhD. Rodrigo Correa Celis, Doctor in Polymer Science And Engineering

Introducción

En los últimos años, el desarrollo tecnológico de los sistemas de almacenamiento de energía a gran escala ha despertado un interés mundial, debido a que estos sistemas pueden llegar a proporcionar ventajas a un sistema eléctrico, desde el apoyo a la generación como el de soporte de transmisión y distribución (EPRI, «Electric Energy Storage Technology Options, 2010 pág. 17). Estas tecnologías están tomando importancia, y cada vez más, se están destinando recursos para investigación y desarrollo, una gran muestra es el compromiso adquirido por los países en la reunión de la COP21 en París, donde un grupo de países con grandes economías, están dirigiendo esfuerzos y recursos en tecnologías de innovación, y pretenden doblar las inversiones en investigación y desarrollo en 20.000 millones de dólares en cinco años. Esta iniciativa quiere fomentar en los entes públicos y privados en el uso de energías limpias (United Nations, 2015), encaminado en lograr reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y empezar a hacer una transición a fuentes de energía renovables.

Este trabajo de grado, se enfoca en los sistemas de almacenamiento mediante aire comprimido (CAES Compressed Air Energy Storage), cuyo funcionamiento básico consiste en comprimir aire en depósitos que puedan soportar altas presiones, para luego liberarlo por medio de una turbina, que acciona un generador y así producir electricidad. Estos sistemas están conformados por elementos similares a los de una turbina de gas convencional, con la diferencia principal que los CAES realizan el proceso de compresión y expansión del aire en momentos

diferentes, lo que les permite almacenar energía, ya sea tomándola de la red o de fuentes renovables (Chen, y otros, 2009 págs. 291-312) (De Samaniego Steta págs. 115, 201).

Los sistemas CAES ofrecen una alternativa para el almacenamiento a gran escala de energía, y cuando entran en la etapa de generación, son capaces de alcanzar su máxima potencia en 10 minutos (AzRISE, 2010). En este método de almacenamiento de energía, existen diferentes variables que influyen considerablemente en el rendimiento, y dependiendo de cómo se realice la compresión del aire, la eficiencia del proceso puede variar sustancialmente. En la actualidad se están investigando y desarrollando sistemas CAES con procesos que apuntan a ser más eficientes, como son el convencional, adiabático y el isotérmico. Cabe mencionar que, los procesos adiabáticos e isotérmicos, no existen comercialmente en la actualidad, lo que hace que este trabajo adquiera importancia para entender el comportamiento de estos sistemas.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general.

Disponer de las herramientas conceptuales y de simulación para el análisis de un sistema de almacenamiento de energía en aire comprimido (CAES, por sus siglas en inglés).

1.2 Objetivos específicos.

Para el cumplimiento del objetivo general de este trabajo de grado se requiere:

- 1) Analizar y detallar el estado del arte de esta tecnología de almacenamiento de energía mediante aire comprimido CAES.
- 2) Simular el almacenamiento de energía en tanques, considerando un proceso CAES convencional, utilizando MATLAB.
- 3) Simular el almacenamiento de energía en tanques, considerando un proceso adiabático (A-CAES), utilizando MATLAB.
- 4) Simular el almacenamiento de energía en tanques, considerando un proceso isotérmico (I-CAES), utilizando MATLAB.

2. Presentación del trabajo de grado

El diseño de programas que permitan la simulación de los sistemas CAES, se logra desarrollando modelos matemáticos y termodinámicos que involucren la mayor parte de variables que puedan intervenir en el proceso. Este trabajo de grado presenta el funcionamiento termodinámico de los sistemas CAES convencional, adiabático e isotérmico, implementados bajo el ambiente de programación MATLAB.

Los objetivos propuestos para desarrollar este trabajo de grado son presentados a continuación.

3. Estado del arte

El concepto de CAES se remonta al año 1949, cuando Stal Laval presentó la primera patente de CAES, utilizando una caverna subterránea para almacenar el aire comprimido (Luo, y otros, 2014 págs. 603-611). Desde esa época, el principio de funcionamiento sigue siendo el mismo, pero fue hasta la década de los 70, que se empezó a implementar comercialmente. En 1978 fue puesta en marcha la planta CAES en Huntorf Alemania, con una capacidad de almacenamiento de 290 MW. Fue diseñada y construida por ABB, para proporcionar potencia

eléctrica en los tiempos donde se requería abastecer picos de demanda máxima (Succar, y otros, 2008 pág. 81).

Luego se desarrolló un segundo modelo de plantas CAES, la planta McIntosh 1 en Alabama, USA, la cual tiene una capacidad de 110 MW, y produce energía eléctrica suficiente para abastecer a unos 110 mil hogares (PowerSouth Energía Cooperativa PowerSouth, 2007). Este proyecto fue optimizado y desarrollado por ENERGY STORAGE POWER CORPORATION (ESPC), quien patentó y desarrolló el concepto CAES. Utiliza las patentes del Dr. Michael Nakhamkin y de ESPC. Entre las características más sobresalientes está el aprovechamiento del calor expulsado por una turbina de baja presión, para utilizarlo en el calentamiento del aire que entra en la turbina de alta presión, logrando mejorar la eficiencia, gracias a que disminuye el consumo de combustible (Nakhamkin, y otros, 2010 pág. 8).

3.1 Tipos de tecnología

En este apartado se describe el funcionamiento de las tecnologías CAES, las cuales serán objeto de estudio en este trabajo de grado.

3.1.1 CAES Convencional. Estas plantas han tenido grandes avances, y nuevas investigaciones están mejorando su eficiencia. ESPC, aplicando los conocimientos adquiridos, desarrolló una serie de nuevas generaciones de plantas CAES, que son más económicas, tienen mayor flexibilidad operativa y un mejor rendimiento. La segunda generación de CAES

("CAES2") son escalables para sistemas de 3 MW a 430 MW, y utilizan el calor residual para la expansión de aire (ENERGY STORAGE POWER CORPORATION).

A continuación, se nombran algunos de los avances de los sistemas CAES de segunda generación:

- CAES segunda generación con el concepto de inyección de aire.
- CAES segunda generación con el concepto de inyección de aire mediante la turbina de expansión.
- CAES-AI con el concepto del aire por ciclos de expansión.

Estos avances se caracterizan por tener configuraciones en la tapara de expansión, que permiten aprovechar el calor generado por las turbinas para utilizarlo en el calentamiento del aire que entra a la cámara de combustión y así reducir el uso de combustible. En la figura (1) se muestra el funcionamiento básico de estos avances.

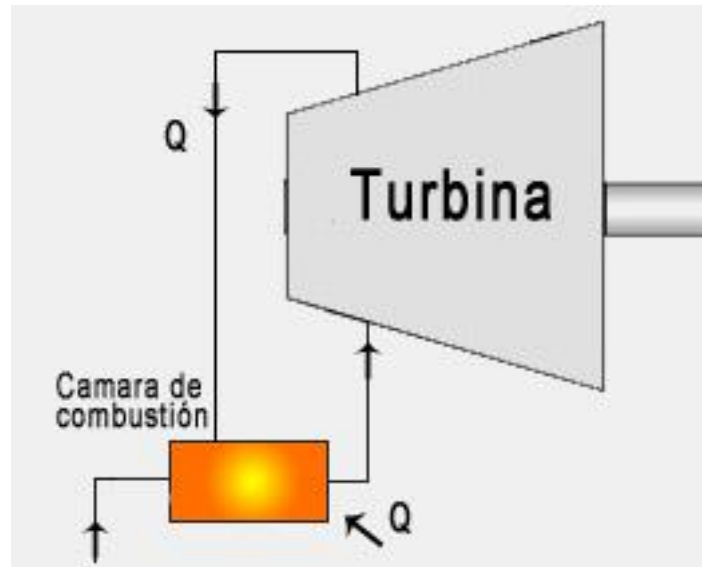


Figura 1. Turbina con sistema de recuperación de calor.

Pero estos avances si bien han representado un aumento en la eficiencia, aun dependen de combustibles para realizar su proceso de generación, lo que ha llevado las investigaciones, a analizar los procesos termodinámicos como el adiabático e isotérmico con el fin de llegar a plantas con cero emisiones. La línea más desarrollada de este tipo de plantas intenta replicar un proceso adiabático, que funcionan de manera similar a las convencionales, con la diferencia de que el calor producido en la compresión y expansión, es almacenado por medio de un sistema de almacenamiento de energía térmica, para ser utilizado en el proceso de expansión, reduciendo el consumo de combustible (Zunft, y otros, 2006 págs. 26-28).

Funcionamiento

El funcionamiento de los sistemas CAES, se basa en el mismo principio con el que operan las plantas de gas convencionales, con la diferencia que las CAES realizan la etapa de expansión y compresión en momentos diferentes (De Samaniego Steta pág. 115), (Succar, y otros, 2008

pág. 81), lo que permite utilizar toda la potencia de salida de la turbina para generar electricidad, que a diferencia de las plantas de gas convencional que utilizan 2/3 de su potencia para realizar el proceso de compresión (Succar, y otros, 2008 pág. 81).

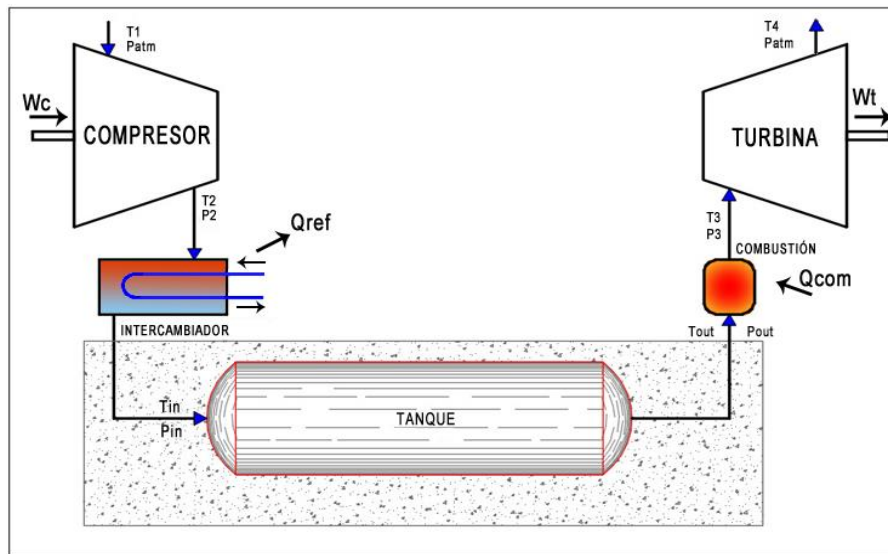


Figura 2. Modelo de una planta CAES convencional

En la figura 2 se pueden observar los elementos básicos que componen un sistema CAES, el cual está compuesto por la etapa de compresión, un intercambiador de calor, el tanque de almacenamiento, y la etapa de expansión.

La etapa de compresión está compuesta por compresores, que pueden acoplarse para formar trenes de compresión, los cuales realizan la compresión generalmente en periodos de baja demanda eléctrica, o alimentados con fuentes de energía renovables, se utilizan varias etapas de compresión con el fin de reducir el trabajo realizado, esta configuración logra una disminución en la temperatura de salida del aire comprimido.

Los depósitos de almacenamiento pueden ser formaciones naturales o artificiales, los naturales se caracterizan por tener grandes capacidades de almacenamiento, por el tamaño de las formaciones subterráneas naturales, algunas de las formaciones naturales que pueden ser utilizadas son: cavernas subterráneas, domos salinos, acuíferos, rocas porosas. Las presiones que se manejan en los depósitos naturales están entre los 60-70 bar, que es una presión segura para no causar daños en el subsuelo, y presiones mínimas que permitan garantizar el control de las presiones hidrostáticas naturales, para evitar filtraciones de agua y otros elementos.

La etapa de expansión, se realiza con turbinas de expansión, que generalmente son turbinas de gas. El aire sale del tanque a una temperatura moderada, lo recibe una cámara de combustión donde se calienta, para alcanzar altas temperaturas que son específicas según el tipo de turbina. Si el aire entrara a la turbina de alta presión a temperaturas bajas, al expandirse se presentarían congelamientos en los alabes debido a la humedad del aire.

Actualmente se están desarrollando plantas de segunda generación, las cuales buscan reducir o eliminar por completo los combustibles fósiles, como son los sistemas adiabáticos, isotérmicos, así como una serie de configuraciones que buscan aprovechar el calor generado por los compresores y las turbinas para optimizar el ciclo de operación.

3.1.2 CAES Adiabático. Los sistemas CAES adiabáticos (ACAES), se han discutido desde 1980, sin embargo, las especificaciones técnicas en ese momento fueron vistas como demasiado ambiciosas. Hoy con un mercado más competitivo de energía eléctrica, y sanciones por las emisiones de gases de efecto invernadero, han impulsado un aumento en las inversiones

para desarrollar fuentes de energía renovables, lo que dirigió nuevamente las investigaciones a nuevas alternativas de almacenamiento de energía eléctrica que sean amigables con el medio ambiente, incluidas las CAES adiabáticas (Zunft, y otros, 2006 págs. 26-28). Aunque no existen plantas con esta tecnología funcionando, ya se están implementando prototipos de investigación con el fin de avanzar en el desarrollo de la tecnología. El Proyecto AA-CAES (Avanzado Adiabático Comprimido Air Energy Storage) financiado por la Unión Europea y un estudio presentado por General Electric y RWE en 2008, demostró que esta tecnología es factible (European Union, 2016).

Actualmente se está desarrollando el proyecto ADELE por el Centro Aeroespacial Alemán (DLR), y las compañías Ed. Züblin AG, ErdgasspeicherKalleGmbH, GE Global Research, Ooms-Ittner-HofGmbH y RWE Power AG el proyecto fue oficialmente puesto en marcha en enero de 2010 y el objeto es lograr una eficiencia del 70% (Energy Storage Association, 2016).

Los CAES-adsorción mejorada es un método avanzado de los ACAES, el cual utiliza una bomba de adsorción de calor, es desarrollada por T. Havel (Compresión Energy, Inc.) y en el proceso se mezclan los ciclos de compresión y expansión, haciendo pasar el aire por zeolita, y realizar el almacenamiento de energía, que se puede recuperar sin utilizar combustible. Las temperaturas de proceso varían de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante la expansión a $107\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante la compresión. El problema es la necesidad de grandes cantidades de zeolita, y la necesidad de eliminar grandes cantidades de calor del lecho de zeolita para adsorber el aire, y luego volver a almacenar grandes cantidades de calor al lecho para liberar el aire. Este enfoque promete CAES sin combustible y un costo bajo, pero todavía está en desarrollo (AzRISE, 2010 pág. 77).

Los grandes retos en desarrollar los CAES adiabáticos, están en lograr que los almacenadores de energía térmica (TES), permitan que el calor se pueda almacenar el mayor tiempo posible; que sea capaz de volver a calentar el aire extraído del tanque de almacenamiento, ya que el calor almacenado sufre cambios en función del tiempo, como resultado de intercambios de calor con su entorno, que se reflejan en pérdidas para el sistema (Steta, y otros). Los proceso adiabático CAES y todas sus variantes no han demostrado eliminar la necesidad de la quema de combustible a menos que se utilice un exceso de energía en el ciclo de compresión, y ese excedente cubra las pérdidas del sistema (AzRISE, 2010).

Funcionamiento

Este sistema consiste en almacenar la energía térmica que se produce en la etapa de compresión, y liberarla para calentar el aire en la etapa de expansión, antes de entrar en la turbina. El principal objetivo de este proceso es reducir la dependencia de la cámara de combustión, y el principal problema radica en la eficiencia de los almacenadores térmicos y el tiempo que puedan conservar la energía térmica almacenada.

El almacenamiento térmico se lleva a cabo usando un intercambiador de calor en la salida de la salida del proceso de compresión. Los almacenadores de calor pueden ser de sal fundida, u otro material con características térmicas buenas, también se puede recuperar calor de la turbina de expansión. Este tipo de gestión térmica puede reducir el consumo de gas natural en un 50% (AzRISE, 2010).

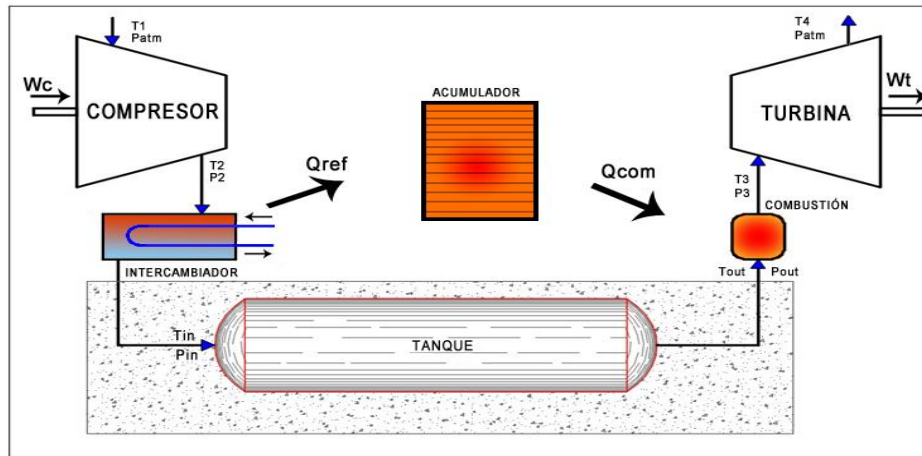


Figura 3. Esquema planta caes adiabático

El proceso de expansión y almacenamiento es el mismo de la planta convencional, una de las características es que la etapa de enfriamiento tiene una etapa adicional como se puede ver en la figura 3, que es el acumulador térmico.

La cámara de combustión no se elimina, porque si en algún momento el calor almacenado, no es suficiente para alcanzar la temperatura que el aire necesita para que la turbina tenga un correcto funcionamiento, este pueda entrar a solventar ese problema. El sistema espera una eficiencia global del 70% en los sistemas de gran escala

3.1.3 CAES Isotérmico. El CAES isotérmico (ICAES) se está desarrollando actualmente, la empresa SustainX, una compañía americana en New Hampshire, desarrolló una planta de demostración de 1,5 MW, que realizó pruebas utilizando agua para absorber el calor del aire cuando se efectúa el proceso de compresión, (el agua retiene el calor resultante de la compresión) logrando que el aire mantenga una temperatura casi constante, y el agua se almacena para luego

usarla en el proceso de expansión (MvBride, y otros, 2013 pág. 4), (Energy Storage Association, 2016) y (EPRI, 2014 págs. 1-10).

Las propiedades del agua hacen que sea un líquido adecuado para el intercambio de calor, por ser de bajo costo, y casi incompresible. Las primeras demostraciones de compresión isotérmica y expansión se hicieron empleando un aerosol para rociar agua y enfriar los pistones que hacen la compresión. Sin embargo, los aerosoles presentaron ciertos inconvenientes, por esta razón SustainX, realizó pruebas con agua burbujeante, pulverizada, y en espuma. El estado donde se obtuvieron los mejores resultados fue en espuma, y concluyeron también que la espuma, tiene gran superficie de contacto, facilita el intercambio de calor, puede ser de larga o de corta duración, y se puede generar y acondicionar en mecanismos separados, para luego inyectarla en cilindros de compresión y expansión (MvBride, y otros, 2013 pág. 4).

Funcionamiento

Este sistema busca reducir al máximo los cambios de temperatura en el sistema, y esto se logra teniendo procesos de compresión y expansión lentos, y esa es una de las restricciones que tiene, que solo es posible a pequeña escala. Una forma puede ser utilizando un tren de compresión que tenga múltiples etapas para lograr presiones entre cada etapa muy pequeña, y que el cambio de temperatura no sea tan alto, esto hace que los compresores hagan el mínimo de trabajo posible.

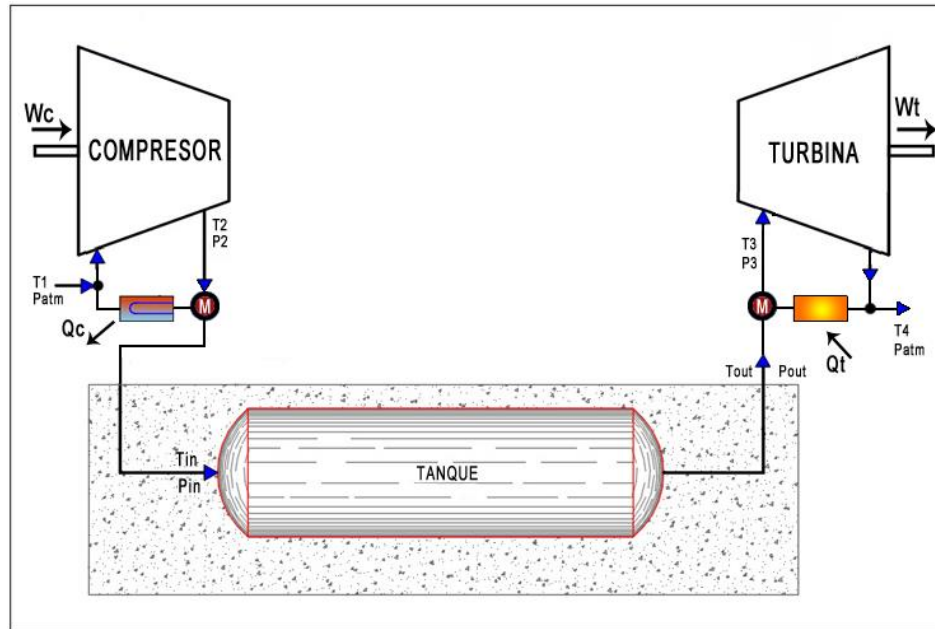


Figura 4. Esquema planta caes isotérmico

Estos sistemas utilizan bombas hidráulicas y compresión con pistones, para comprimir isotérmicamente aire (Kim, y otros, 2012 págs. 1501-1521), La bomba hidráulica se utiliza para suministrar el fluido refrigerante en los pistones, la velocidad del sistema se puede cambiar de acuerdo con la presión del pistón y el líquido (ver figura 4), y puede ser necesario para ahorrar tiempo y para eliminar el sobrecalentamiento, la compresión isotérmica ocurre cuando se extrae todo el calor que el gas adsorbe por el trabajo de compresión, por lo tanto, el gas fluye con la misma energía interna que tenía antes de ser comprimido (C. M. S. Virgi Moring Faires, 1983).

El sistema SustainX no utiliza gas natural y funciona a presiones que van desde 0 a 3000 psi. Este sistema ha demostrado trabajar en potencias menores a 1 MW de potencia y eficiencias superiores al 70%, con la posibilidad de depósitos de almacenamiento en la superficie (AzRISE, 2010).

4. Fundamento teórico

En este capítulo se describen, los conceptos empleados en este trabajo de grado. En la primera parte se van a describir los procesos termodinámicos que intervienen en un proceso CAES.

Un sistema CAES en su modelo fundamental está compuesto por una etapa de compresión, almacenamiento y expansión, (ver figura 5). A continuación, se describen cada una de las etapas que intervienen en el proceso.

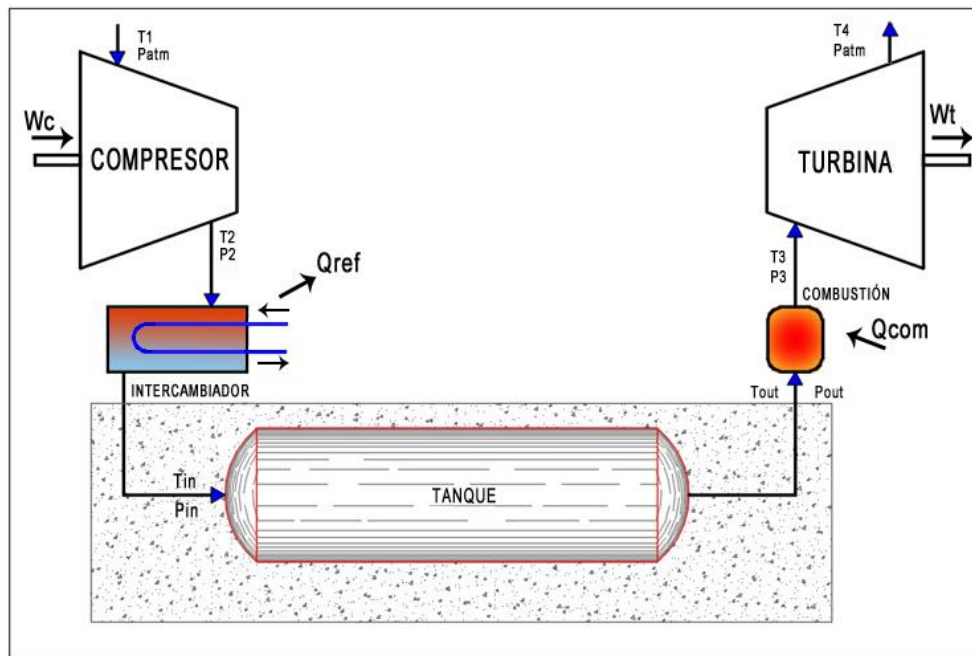


Figura 5. Esquema planta CAES convencional.

Los sistemas CAES, por sus características cumplen algunos principios termodinámicos, y que se aplican a los modelos convencional, adiabático e isotérmico.

Etapas de compresión

Esta etapa la realizan compresores, que toman el aire a condiciones ambientales y lo comprimen a las presiones características del sistema (Ver figura 6). Los compresores son dispositivos de ingeniería que funcionan durante largos periodos bajo las mismas condiciones, una vez superado el periodo de inicio que es transitorio (Cengel, y otros, 2008 pág. 1048). Existen diferentes formas de modelar el proceso de compresión, mediante un proceso isotérmico, isentrópico o politrópico, pero todos tienen el mismo principio, que tiene que ver con el flujo de masa dentro y fuera de los dispositivos, que los cataloga como sistemas abiertos o de volumen de control (Cengel, y otros, 2008).

Aplicando el primer principio de la termodinámica, para un compresor, se debe cumplir, que la energía que entra al sistema es igual a la que sale (Lluis, y otros, 2012). La ecuación de energía de un compresor se puede expresar de la siguiente manera:

$$W_c = q + \Delta u + \Delta(pv) + \Delta e_c + \Delta e_p \quad (1)$$

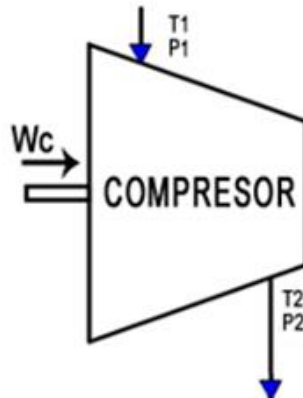


Figura 6. Compresor

Donde W_c es el trabajo suministrado al sistema, q es el calor disipado, Δu el incremento de la energía interna específica, $\Delta(pv)$ el incremento de la energía concentrada en forma de presión, Δe_c el incremento de la energía cinética por unidad de masa, Δe_p es el incremento de la energía potencial. Donde el incremento de la energía interna específica más el incremento de la energía concentrada en forma de presión es igual a la variación de la entalpía específica Δh . Ver ecuación (2).

$$\Delta h = \Delta u + \Delta(pv) \quad (2)$$

Un proceso de compresión isentrópico con energía cinética y potencial despreciables se caracteriza por ser internamente reversible, y en el caso del compresor el intercambio de calor entre el aire que se está comprimiendo y el medio es despreciable, debido a la rapidez con la que ocurre el proceso. Aclarando esto se puede llegar a la expresión del trabajo de entrada del compresor, reemplazando la ecuación (2) en (1), se obtiene una nueva expresión para el trabajo. Ver ecuación (3).

$$w_c = \Delta h \quad (3)$$

Para un gas ideal, la variación de la entalpía específica Δh , es igual a el calor específico a presión constante c_p , multiplicado por la variación de temperatura ΔT . Ver ecuación (4).

$$\Delta h = c_p \Delta T \quad (4)$$

Remplazando (4) en (3) se obtiene una nueva expresión para el trabajo del compresor. Ver ecuación (5):

$$w_c = c_p(T_2 - T_1) \quad (5)$$

En un proceso isentrópico se permiten utilizar las siguientes relaciones, ver ecuaciones (6), (7) y (8), siempre y cuando se trabaje con un gas ideal y calores específicos constantes.

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (6)$$

Donde T_1 es la temperatura de entrada al compresor, T_2 la temperatura de salida luego de realizar el proceso de compresión, P_1 y P_2 son la presión de entrada y salida respectivamente como se ve en la figura 6, y k es el coeficiente isentrópico, el cual varía con la temperatura, con $k=1$ para procesos isotérmico y $k=1,4$ para procesos isentrópico. La relación entre el calor

especifico a presión constante c_p y el caos especifico a volumen constante c_v para un gas ideal se representa con la ecuación (7).

$$k = \frac{c_p}{c_v} \quad (7)$$

La constante de los gases R se puede representar en función de los calores especifico. Ver ecuación (8).

$$R = c_p - c_v \quad (8)$$

Con las ecuaciones (6), (7) y (8), y realizando las simplificaciones y sustituciones correspondientes se llega a la ecuación (9) que describe el trabajo del compresor.

$$W_c = \frac{kRT_1}{k-1} \left\{ \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k} - 1 \right\} \quad (9)$$

Los compresores reales no se comportan de forma isentrópica, por lo que se hace necesario considerar el rendimiento isentrópico (n_s), el cual se expresa en función del estado del gas en la entrada y salida del compresor y se representa mediante la ecuación (10):

$$n_s = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1} \quad (10)$$

Siendo T_{2s} , la temperatura isentrópica y se relaciona con el trabajo ideal del compresor. El trabajo del compresor para un modelado más real se puede representar con la ecuación (11).

$$W_c = \frac{kRT_1}{n_s(k-1)} \left\{ \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k} - 1 \right\} \quad (11)$$

La temperatura de salida del compresor T_2 , se puede calcular despejándola de la ecuación (12):

$$T_2 = T_1 + \frac{W_c}{C_p} \quad (12)$$

Tren de compresión

Cuando se desea comprimir gas a grandes presiones, es recomendable hacer la compresión por etapas, a estas configuraciones se le conoce como tren de compresión o compresión multietapa (ver figura 7), la cual permite una relación de presión entre compresores más baja, lo que afecta directamente en la temperatura de salida del gas y el trabajo realizado.

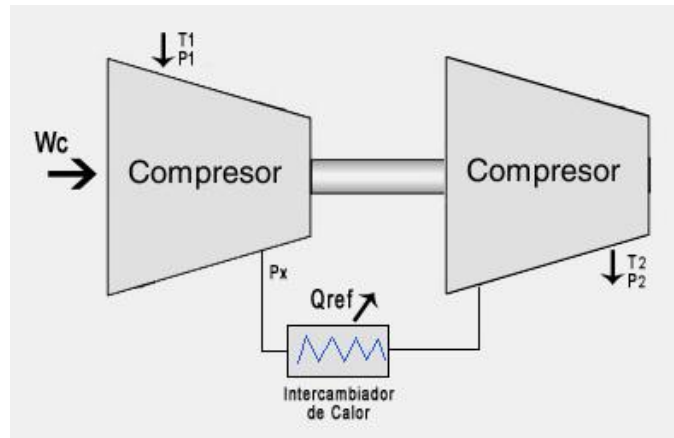


Figura 7. Tren de compresión

Para garantizar que el trabajo de compresión sea mínimo, las presiones entre las etapas se calculan con la ecuación (13):

$$p_x = (p_2/p_1)^{1/N} \quad (13)$$

Donde p_2 y p_1 son las presiones en la salida y en la entrada del tren de compresión y N es el número de compresores que conforman el tren. El trabajo para la compresión multietapa con refrigeración intermedia de n etapas está dado por la ecuación (14):

$$W_{ent} = \frac{kRT_1}{k-1} \left\{ \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k} - 1 \right\} + \frac{kRT_1}{k-1} \left\{ \left(\frac{P_2}{P_3} \right)^{(k-1)/k} - 1 \right\} + \dots n \quad (14)$$

Cuando se introducen muchas etapas de compresión el proceso tiende a ser el ideal, aproximándose a un proceso isotérmico (Succar, y otros, 2008 pág. 81).

Etapas de enfriamiento

Esta etapa reduce la temperatura del aire que sale de los compresores, y que ingresa al tanque de almacenamiento, esto se realiza con el fin de proteger los tanques de altas temperaturas y tener temperaturas más bajas en la entrada, lo que hace posible almacenar mayor cantidad de masa (Cengel, y otros, 2008). La etapa de enfriamiento la realiza el intercambiador de calor representado en la figura 8.

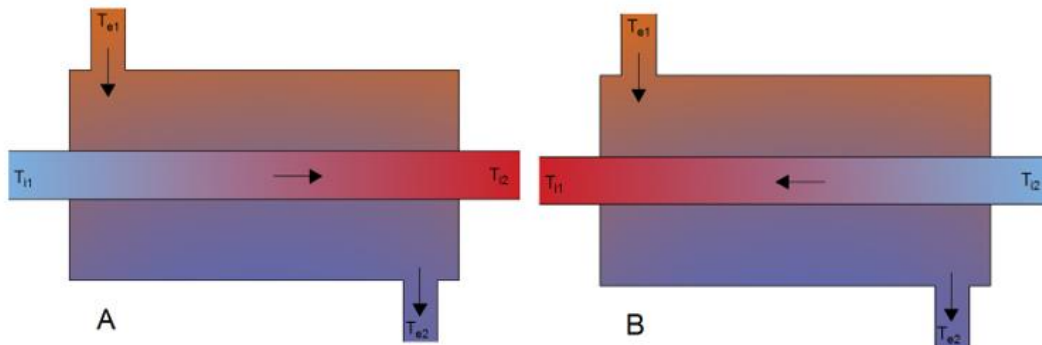


Figura 8. Intercambiador de calor

Cuando existe una temperatura constante en el interior como el exterior de un tubo, la transferencia de calor por unidad de masa está dada por la ecuación (15):

$$q = \Delta u - w_f \tag{15}$$

Donde Δu es el cambio de la energía interna, y w_f la fricción del fluido, si se desprecia la fricción, la ecuación (13) se puede reescribir como la ecuación (16).

$$\mathbf{q} = \Delta\mathbf{u} \quad (16)$$

Donde la variación de la energía interna se puede representar mediante la ecuación (17):

$$\Delta\mathbf{u} = \mathbf{c}_p(\mathbf{T}_2 - \mathbf{T}_1) \quad (17)$$

Donde T_2 y T_1 son la temperatura de salida y entrada del fluido respectivamente.

Remplazando (17) en (16), la transferencia de calor se puede representar con la ecuación (18):

$$\mathbf{q} = \mathbf{c}_p(\mathbf{T}_2 - \mathbf{T}_1) \quad (18)$$

Etapa de almacenamiento

El almacenamiento de estos sistemas, depende de la potencia que se va a generar, las plantas existentes por ser plantas de gran capacidad, tienen depósitos de almacenamiento subterráneos naturales de grandes volúmenes, que se comportan adiabáticamente, los cuales están ubicados en domos de sal, por sus características de permeabilidad, aunque hay estudios (Succar, y otros, 2008 pág. 81), donde se analizan otros lechos subterráneos como acuíferos, roca porosa y minas abandonadas. El almacenamiento en tanques está más enfocado a plantas de menor capacidad.

En la etapa de almacenamiento ocurren tres procesos, el llenado, el tiempo que dura almacenado el aire, y el vaciado. Estos procesos tienen la característica que presentan propiedades que varían durante el tiempo, y las etapas de llenado y de vaciado ocurren en momentos diferentes.

Proceso de llenado

El proceso de llenado del tanque es un proceso no estacionario, donde se asume que el flujo másico que llena el tanque es constante y la temperatura de entrada del aire depende del sistema CAES que se implemente.

El llenado del tanque y su análisis transitorio con flujo uniforme y condiciones internas del tanque homogéneas se rige por la ecuación (19):

$$\frac{dM_{vc}}{dt} = \dot{m}_c \quad (19)$$

Donde \dot{m}_c es el flujo másico de aire suministrado por el compresor y M_{vc} es la masa en el volumen de control o tanque.

El estado inicial del tanque no está totalmente en vacío, por lo que dentro del tanque siempre hay una masa de aire inicial. Considerando esta condición, la ecuación del llenado en función del tiempo se expresa mediante la ecuación (20).

$$M_{vc}(t + dt) = M_{vc}t + \dot{m}_c dt \quad (20)$$

Donde $M_{vc}t$ es la masa inicial del tanque y $\dot{m}_c dt$ es la masa que entra al tanque durante un tiempo.

El comportamiento de la energía en el tanque es similar al descrito por la masa; siempre habrá una energía inicial y la variación de la energía en el tiempo está dada por la ecuación (21):

$$E_{vc}(t + dt) = E_{vc}t + \dot{m}_c h dt \quad (21)$$

Donde $E_{vc}t$ es la energía inicial del tanque antes del llenado y $\dot{m}_c h dt$ es la energía que entra al tanque durante el tiempo de llenado. La energía inicial se representa mediante la siguiente ecuación (22):

$$E_{vc}t = T_{vc} C_v M_{vc} \quad (22)$$

Se asume que el tanque presenta una condición adiabática, entonces las expresiones de la energía interna ecuación (23) y la entalpia ecuación (24) son válidas (Donald, y otros, 2001).

$$u = c_v T \quad (23)$$

$$h = c_p T \quad (24)$$

Remplazando (24) en (21), se tiene otra forma de hallar la energía en el tanque. Ver ecuación (25):

$$E_{vc}(t + dt) = E_{vc}t + \dot{m}_c c_p T_{in} dt \quad (25)$$

La temperatura en el tanque se despeja de la ecuación (22), y se expresa con la ecuación (25).

$$T_{vc} = \frac{E_{vc}}{C_v M_{vc}} \quad (26)$$

La presión se calcula con la ecuación del gas ideal, ecuación (27):

$$P_{vc} = \frac{M_{vc} T_{vc} R_{aire}}{V_{vc}} \quad (27)$$

Donde V_{vc} es el volumen del tanque, M_{vc} la masa de aire en el tanque, T_{vc} la temperatura del aire en el tanque y R_{aire} la constante universal de los gases.

Proceso de vaciado del tanque

La etapa de vaciado se rige por los mismos principios del proceso de llenado, asumiendo un flujo constante y un comportamiento variante en el tiempo, que debe maniobrar dentro de los límites establecidos de presión.

El balance de masa se expresa con la ecuación (28):

$$\frac{dM_{vc}}{dt} = \dot{m}_t \quad (28)$$

Donde \dot{m}_t es el flujo másico entrando en la turbina.

En el tiempo y con condiciones iniciales establecidas la masa en el intervalo de tiempo del vaciado del tanque se puede expresar con la ecuación (29):

$$E_{vc}(t + dt) = E_{vc}t - \dot{m}_t h dt \quad (29)$$

La temperatura en el tanque se calcula con la ecuación (26), y la presión con la ecuación (27)

Etapas de expansión

En esta etapa el aire que sale del tanque es tomado por las turbinas, para accionar un generador. Cuando el aire sale del tanque, primero pasa por una cámara de combustión el cual quema un combustible fósil, para calentar el aire que va a entrar a la turbina como se puede ver en la figura 9.

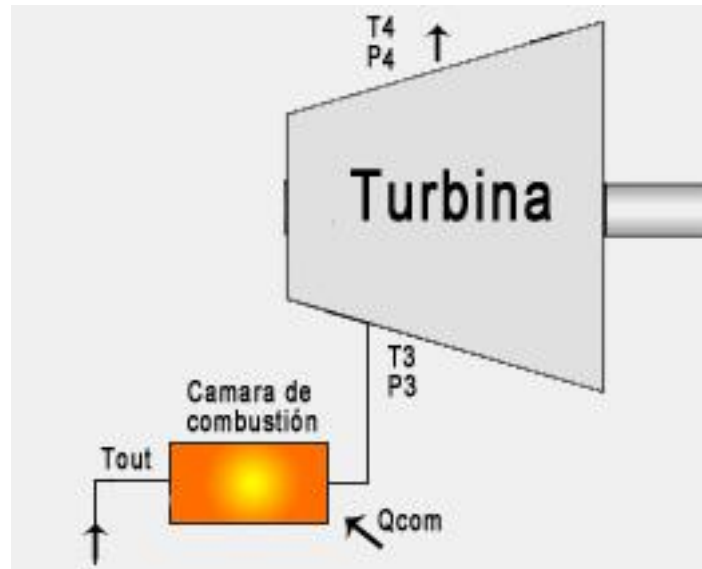


Figura 9. Turbina de gas

Cámara de combustión

Esta etapa se hace para calentar el aire que sale del tanque y que entra a la turbina, el cual debe estar entre 815 y 1095° (C. M. S. Virgi Moring Faires, 1983), esta temperatura debe estar controlada para no generar daños, con el fin de tener una temperatura óptima que permita el correcto funcionamiento de la turbina, la energía calorífica que debe aportar la cámara de combustión se expresa mediante la ecuación (30):

$$Q_{com} = \dot{m}_t c_p (T_3 - T_{out}) \quad (30)$$

Donde Q_{com} es la energía térmica producida por dicho elemento, \dot{m}_c es el flujo másico de la turbina, c_p calor específico del aire a presión constante, T_3 temperatura de entrada a la turbina y T_{out} temperatura de entrada a la cámara. Ver figura 9.

Turbina de gas

La turbina es una maquina térmica que convierte en trabajo mecánico la energía que se encuentra en un fluido a una presión y temperatura elevada (García Garrido, y otros, 2008). Este dispositivo se puede modelar como un proceso isentrópico y al igual que el compresor son dispositivos de volumen de control con flujo constante. El trabajo suministrado al a turbia esta descrito en la ecuación (31):

$$W_t = \frac{kRT_3}{k-1} \left\{ 1 - \left(\frac{P_3}{P_4} \right)^{(k-1)/k} \right\} \quad (31)$$

Donde T_3 es la temperatura del aire en la entrada de la turbina, P_3 y P_4 las presiones en la entrada y salida respectivamente. Ver figura 9.

Las turbinas reales no se comportan de forma isentrópica, por lo que se hace necesario considerar el rendimiento isentrópico (n_s), el cual se expresa en función del estado del gas en la entrada y la salida, se representa mediante la ecuación (32):

$$n_s = \frac{T_3 - T_{4s}}{T_3 - T_4} \quad (32)$$

Siendo T_{4s} , la temperatura isentrópica y se relaciona con el trabajo ideal de la turbina.

La eficiencia isentrópica para turbinas pequeñas de una sola etapa oscila entre el 60-65%, en turbinas medianas del 75-80%, y más del 85% para grandes, un rendimiento isentrópico mayor implica una temperatura de salida más baja, lo que se relaciona con una disminución en la entalpia por lo tanto un mayor trabajo (García Garrido, y otros, 2008). Aplicando el mismo

análisis que en el compresor, la temperatura en la salida de la turbina se calcula con la ecuación (33):

$$T_4 = T_3 - \frac{W_t}{C_p} \quad (33)$$

Exergía

La exergía es el trabajo útil que un sistema puede proporcionar en un estado determinado (Donald, y otros, 2001). Los elementos que conforman un sistema CAES son dispositivos modelados bajo la condición de volumen de control con flujo estacionario. La ecuación (34) describe el cambio exergético en la corriente de un fluido que va de un estado inicial a un estado final.

$$\Delta\psi = \Delta h + T_o * \Delta s + \frac{\Delta V^2}{2} + g * \Delta z \quad (34)$$

Donde Δ es la diferencia entre dos estados, T_o es la temperatura ambiente, h es entalpia, s es la entropía, $\frac{V^2}{2}$ es la energía cinética y $g * z$ es la energía potencia.

Exergía asociada a la transferencia de calor

En los dispositivos donde ocurre transferencia de calor es necesario calcular la exergía inherente a este proceso, dicha exergía se obtiene mediante la ecuación (35):

$$\Phi_Q = Q \left(1 - \frac{T_0}{T_1} \right) \quad (35)$$

Donde T_1 , es la temperatura de la región donde se va a calcular la entropía, y T_0 es la temperatura de los alrededores.

Trabajo reversible

Es el trabajo útil que se puede obtener de los dispositivos. En los dispositivos como compresores y turbinas se calcula según la ecuación (36).

$$\dot{w}_{\text{rev}} = \dot{m}(\psi_1 - \psi_2) + \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k} \right) * \dot{Q} \quad (36)$$

Donde \dot{m} es el flujo másico, $(\psi_1 - \psi_2)$ es la variación de exergía entre dos estados, T_0 es la temperatura ambiente, T_k es la temperatura de la región donde se calcula la entropía y \dot{Q} es la tasa de calor que entra al sistema.

Balance de exergía sistema cerrado

La ecuación (37) define el balance de exergía, que expresa el cambio de exergía de un sistema durante un proceso y se escribe de la siguiente manera:

$$X_1 - X_2 - X_{\text{destruida}} = \Delta X \quad (37)$$

Donde los subíndices 1 y 2 representa la exergía de entrada y salida respectivamente, y $X_{\text{destruida}}$ es la exergía destruida en el proceso.

Balance de exergía en volúmenes de control

La ecuación (38) indica el balance de exergía de un volumen de control.

$$X_{\text{calor}} - X_{\text{trabajo}} + X_{\text{masa 1}} - X_{\text{masa 2}} - X_{\text{destruida}} = \Delta X \quad (38)$$

Donde la X_{calor} es la tasa neta por transferencia de calor a través de la frontera de control y se calcula según la ecuación (35), $X_{\text{masa 1}}$ es la exergía de la masa de entrada, $X_{\text{masa 2}}$ es la exergía de la masa de salida, X_{trabajo} es la exergía debido al trabajo y $X_{\text{destruida}}$ es la exergía debido a las irreversibilidades del sistema.

Eficiencia

Las plantas CAES por ser sistemas donde intervienen distintos procesos y formas de energía, no tienen una sola metodología para el cálculo de los rendimientos, donde la expresión depende de la configuración, y contra que parámetro se va a comparar la eficiencia (Succar, y otros, 2008 pág. 81).

Rendimiento exergético del compresor

La ecuación (39), representa el rendimiento del compresor, donde $W_{\text{real.ent}}$ es el trabajo en la entrada, i es la irreversibilidad o perdidas.

$$\epsilon_c = \frac{W_{\text{real.ent}} - i}{W_{\text{real.ent}}} \quad (39)$$

Rendimiento exergético de la turbina

La ecuación (40) representa el rendimiento de la turbina donde $W_{\text{real.salida}}$ es el trabajo en la salida, i es la irreversibilidad o perdidas.

$$\epsilon_t = \frac{W_{\text{real.salida}}}{W_{\text{real.salida}} + i} \quad (40)$$

5. Simulación

En este apartado se presentan los resultados de los modelos utilizados para la simulación de los procesos CAES convencional, adiabático e isotérmico. A partir de la información recopilada en cada simulación, se comparan las eficiencias de cada etapa, así como las de los sistemas completos.

5.1 Parámetros de simulación

La descripción de los modelos utilizados en este trabajo está sujeto a las siguientes hipótesis: el gas a comprimir es aire, y su comportamiento se asumirá como gas ideal, con calores específicos constantes, temperatura ambiente de 28°C y presión atmosférica de 101,325 kPa, y las propiedades del aire se definen en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros del gas ideal.

Parámetro	Valor	Unidad
M	28,970	[kg/kmol]
R	0,287	[kJ/kg-K]
k	1,400	-
c_p	1,005	[kJ/kg-K]
c_v	0,718	[kJ/kg-K]

Tanque de almacenamiento

Para la selección de las presiones con las que se realizaron las simulaciones, se tuvo como referencia la bibliografía, donde coinciden que unas presiones muy altas en los depósitos naturales, pueden afectar su estabilidad geológica. Para el caso en particular de este trabajo de grado, donde el almacenamiento se simula en tanques, se pueden tomar rangos de presiones más altas. Los valores referencias conocidos son los de las plantas de Huntorf y Alabama, que van desde 46 bar de presión mínima y 72 bar la máxima (Succar, y otros, 2008 pág. 81).

Una limitante del almacenamiento en tanques es el volumen, por cuestiones de costos y diseños, serían inviable pensar en los volúmenes que manejan los depósitos naturales. Se considera un volumen total de almacenamiento de 500 m³, que es razonable para la fabricación de tanques cilíndricos, el cual no necesariamente deba ser un único tanque. Para este trabajo se busca tener dimensiones que sean razonables. Cabe resaltar que con este volumen no se puede esperar unas grandes potencias de generación.

Si se tiene un volumen total de 500 m³, los cuales se reparten en 3 cilindros, para tener cilindros más reales. Cada cilindro tendrá 166,7 m³ y sus dimensiones aplicando la fórmula para el volumen en un cilindro.

$$\text{Volumen cilindro} = \pi r^2 * l \quad (41)$$

Remplazando el volumen y asumiendo la longitud de los cilindros de 10 m el radio sería de 2.03 m.

La presión interna que puede soportar el cilindro se calcula la ecuación (42) de Laplace-Young:

$$P = \frac{\epsilon \sigma}{r} \quad (42)$$

Donde P es la presión interna en [Pa], ϵ es el espesor de la pared en [m], r es el radio interior del cilindro en [m] y σ es la tensión circunferencial en [Pa].

En la tabla 2 se muestran los valores de resistencia del acero inoxidable, que se toman como referencia para el cálculo de la presión máxima que puede soportar un recipiente.

Tabla 2. Materiales

Material	Resistencia a la tensión [Mpa]	Resistencia a la cedencia [Mpa]	% de alargamiento
Acero inoxidable (440C)	1865	1896	2

Fuente: Askeland, D. E.; Fulay, P. y Bhattacharya, D.K. Fundamentos de ingeniería y ciencia de materiales, Segunda ed. Mexico,D.F, 2010

Según la hipótesis de pared delgada el espesor de la pared del tanque no debe ser menor o igual a una décima parte del radio. Asumiendo $\frac{e}{r} = 10$, la presión interna máxima del cilindro sería de 1865 [MPa], o 18650 [bar].

Cabe resaltar que es posible tomar presiones mínimas mucho más bajas, porque no hay ningún inconveniente geológico.

En la tabla 3 se muestran diferentes pruebas que se realizaron en el modelo CAES convencional, variando la presión máxima y mínima con el fin de observar el comportamiento de la temperatura que es la variable que más influye sobre los materiales. El intervalo de presión donde se observó una baja diferencia de temperatura fue el de 4000 – 8000 [kPa].

Tabla 3. Características del tanque de almacenamiento

Pmin [Kpa]	Pmax [Kpa]	Tmin [°C]	Tmax [°C]
2000	10000	-21,657	125,181
3000	10000	-0,687	111,186
4000	8000	25,655	91,103
4000	7000	32,437	85,426
4000	10000	14,199	100,200
4000	12000	4,777	107,264

Selección de flujos máxicos

Para la selección del flujo, se realizaron algunas pruebas con el modelo convencional programado, variando los flujos de entrada al compresor y la turbina, dejando el volumen constante, la relación compresión/expansión se analizó del sistema CAES de Huntorf, el cual tiene un flujo máxico de compresión de 108 kg/s y de expansión de 417 kg/s, más o menos una relación de 1/4.

Tabla 4. Variación de flujo y tiempo

FLUJOS [kg/s]		TIEMPOS [hh:mm:ss]	
Compresión	Expansión	Compresión	Expansión
0,25	1	16:36:04	04:09:01
0,5	2	08:18:02	02:04:30
0,75	3	05:32:01	01:23:0
1	4	04:09:01	01:02:15
1,25	5	03:19:13	00:49:48

En la tabla 4 se observan los resultados obtenidos y se escogió un flujo másico de 0,5 kg/s al compresor y de 2 kg/s a la turbina.

5.2 Simulación caes convencional

El modelo propuesto está integrado por un compresor, un intercambiador térmico antes de la entrada del tanque de almacenamiento, el cual controlara la temperatura de entrada del aire al tanque, manteniéndola constante en 60 °C, una temperatura ambiente de 28 °C, el tanque de almacenamiento el cual tiene un comportamiento adiabático, y la etapa de expansión como se puede observar en la figura 10.

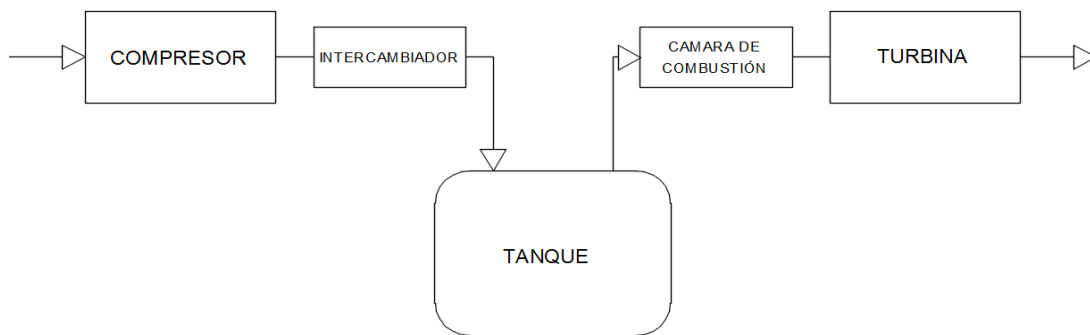


Figura 10. Modelo CAES convencional

La etapa de expansión está conformada por una turbina y una cámara de combustión, la temperatura de funcionamiento de la turbina, que se escogió tomando como referencia algunas turbinas comerciales, se asumió en este caso particular de 875°C. La figura 10, muestra el esquema implementado en la simulación.

5.2.1 Parámetros iniciales. En la tabla 5 se muestran los valores de entrada de la simulación.

Tabla 5. Condiciones de entrada

CAES convencional	Parámetro	Valor	Unidades
Condiciones ambientales	T_1	28	[°C]
	P_1	101,325	[kpa]
Compresor	T_1	28	[°C]
	P_1	101,325	[kPa]
	\dot{m}	0,5	[kg/s]
	n_s	0,85	-
Intercambiador	T_{salida}	60	[°C]
Tanque	$T_{entrada}$	60	[°C]
	P_{max}	8000	[kPa]
	P_{min}	4000	[kPa]
	V	500	[m ³]
Turbina	T_3	875	[°C]
	\dot{m}	2	[Kg/s]
	n_s	0,85	-

5.2.2 Resultados. En la tabla 6 se encuentra el tiempo de simulación de las etapas de compresión y de expansión y el tiempo total de un ciclo. El tiempo del proceso depende del caudal másico de la turbina y el compresor, así como de las temperaturas de operación de los dispositivos.

Tabla 6. Duración ciclo

Etapas	Tiempo [hh:mm:ss]
Compresión	8:18:02
Expansión	2:04:30
Completo	10:22:32

Este tiempo servirá como referencia para la comparación con los otros sistemas propuestos.

Temperaturas

En la tabla 7 se muestran las temperaturas máximas y mínimas que alcanza el sistema en las etapas.

Tabla 7. Temperaturas

Proceso	T mínima en [°C]	T máxima en [°C]
Salida compresor	686,362	908,149
Tanque	25,66	91,106
Salida turbina	179,171	240,514

La temperatura final del tanque aumento considerablemente respecto a la temperatura de entrada, esto se debe a que el flujo que está entrando está realizando un trabajo, y como el volumen permanece constante las moléculas del gas van a empezar a chocar cada vez que la presión aumente, una temperatura muy elevada es favorable a la hora de la expansión, porque reduce el consumo de combustible en la cara de combustión, pero también afectaría el tanque, que al ser de acero la dilatación térmica puede afectar su estabilidad.

Potencia del compresor y la turbina

Los resultados de la tabla 8 muestran que durante aproximadamente dos horas se generará una potencia de 1343,521 KW, pero también es posible operar la planta a potencias más bajas durante un tiempo más largo, eso depende de la turbina que se seleccione. El volumen del tanque también influye en la potencia que se puede generar, esto se debe a que una turbina que tenga una mayor capacidad de generar trabajo, necesita un mayor caudal másico.

Tabla 8. Potencia

	[kW]
Potencia compresor	390,921
Potencia turbina	1343,521

Análisis exergético

Los resultados del balance de exergético están plasmados en la figura (11) y en la tabla 9.

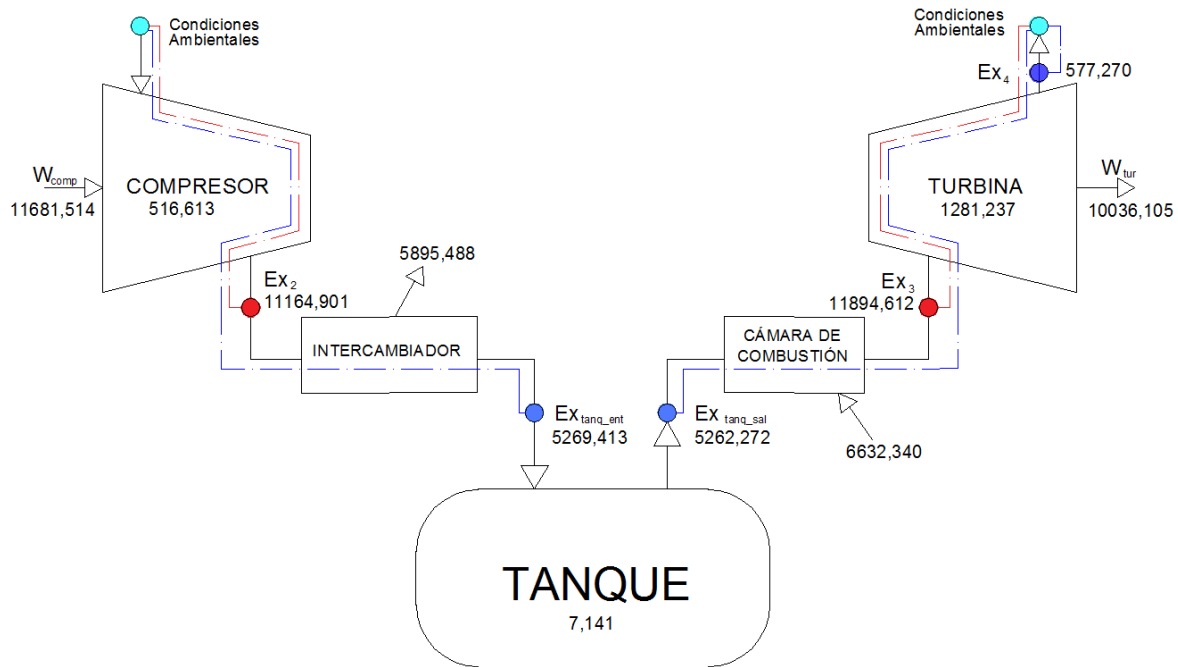


Figura 11. Esquema balance exergético CAES convencional (valores en MJ)

En la figura 11 se observa el flujo del aire del sistema y la variación de la exergía a través de todos los dispositivos.

Tabla 9. Balance exergético

Etapa		Valor en [MJ]
Compresor	Trabajo consumido	11681,514
	Exergía de salida	11164,901
	Perdidas	516,613
Intercambiador	Calor de salida	11201,242
	Exergía por calor	5895,488
Tanque	Exergía de entrada	5269,413
	Exergía de salida	5262,272

Etapa		Valor en [MJ]
	Perdidas	7,141
Camara de combustión	Exergía por calor	6632,340
	Calor de entrada	12232,166
Turbina	Trabajo generado	10036,105
	Exergía de entrada	11894,612
	Exergía salida de gases	577,270
	Perdidas	1281,237

Como ya se mencionó en apartado 4.4, existen diferentes formas de calcular la eficiencia de estos sistemas, y con el fin de tener una forma de comparar la eficiencia de los sistemas CAES, la eficiencia se calcula en base a la exergía del sistema. Habiendo aclarado lo anterior, se puede seguir con el análisis de eficiencias.

La etapa de compresión, compuesta por compresor y el intercambiador térmico, tienen una eficiencia del 45,11%, el tanque, debido a que se consideró adiabático, las pérdidas son despreciables y la eficiencia es del 99,86%, la etapa de expansión la eficiencia fue del 84,38%, lo que da una eficiencia total del 38,01%.

La figura 12, muestra la temperatura y la presión en función del tiempo. La pendiente positiva indica la etapa de compresión y la de pendiente negativa la de expansión. Se puede ver que el inicio de la etapa de compresión es el mismo al final de la etapa de expansión. Los demás modelos tienen este mismo comportamiento.

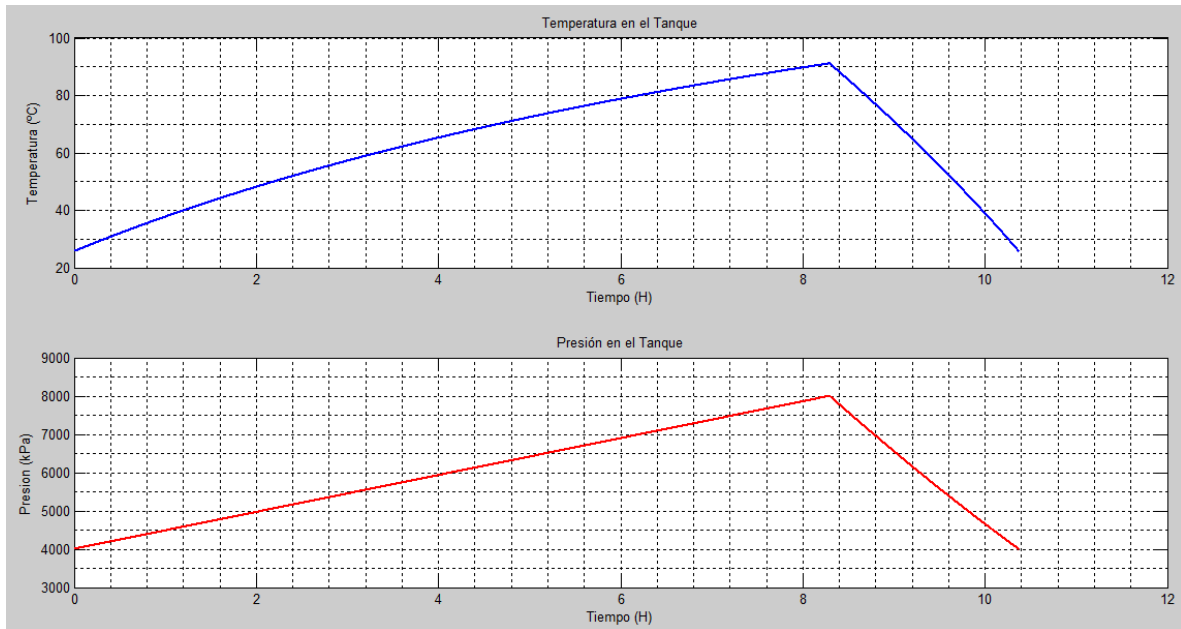


Figura 12. Variación de la temperatura y la presión en el llenado del tanque

5.3 Simulación caes adiabático

En el CAES adiabático el factor que más influye en el rendimiento de la planta es el sistema de almacenamiento térmico, tiene los mismos componentes del convencional, más el acumulador como se ve en la figura 13. En este trabajo se consideraron varios casos para el rendimiento térmico del acumulador. Esta tecnología es una de las más prometedoras y logra incrementar en teoría sustancialmente la eficiencia del sistema.

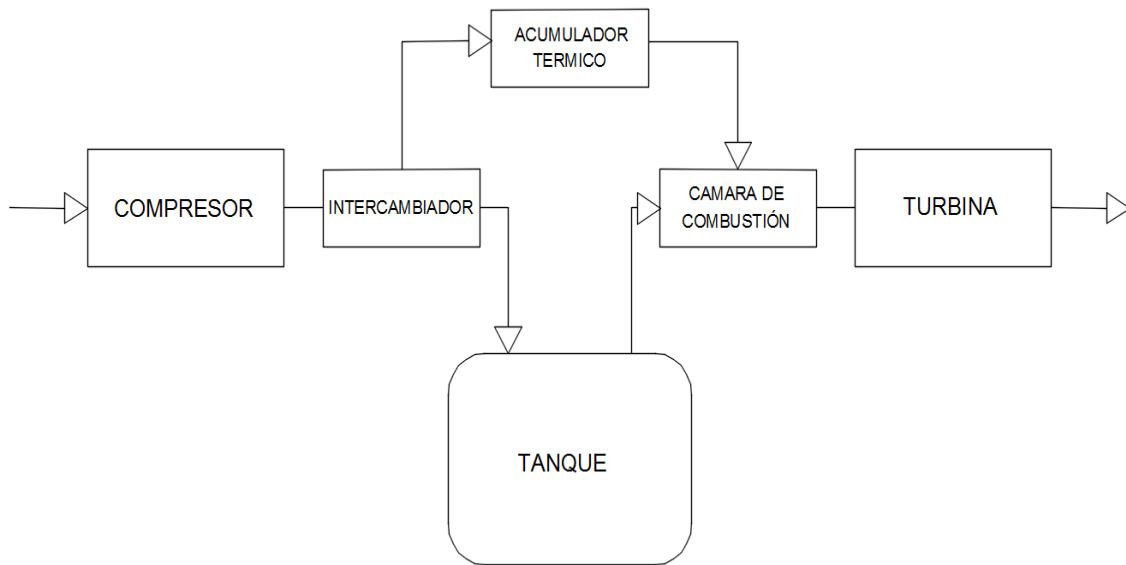


Figura 13. Modelo CAES adiabático

5.3.1 Parámetros iniciales. En la tabla 10 se muestran los valores de entrada de la simulación.

Tabla 10. Condiciones de entrada

CAES adiabático	Parámetro	Valor	Unidades
Condiciones ambientales	T_1	28	[°C]
	p_1	101,325	[kpa]
Compresor	T_1	28	[°C]
	p_1	101,325	[kpa]
	\dot{m}	0,5	[Kg/s]
	n_s	0,85	-
Intercambiador	T_{salida}	70	[°C]
Tanque	$T_{entrada}$	60	[°C]
	p_{max}	8000	[kpa]

CAES adiabático	Parámetro	Valor	Unidades
	p_{min}	4000	[kpa]
	V	500	[m3]
Almacenador térmico	n	0,8	-
Turbina	T_3	875	[°C]
	\dot{m}	2	[Kg/s]
	n_s	0,85	-

5.3.2 Resultados. En la tabla 11 se encuentra el tiempo de simulación de las etapas de compresión y de expansión y el tiempo total de un ciclo. El tiempo del proceso depende del caudal másico de la turbina y el compresor.

Tabla 11. Duración ciclo.

Etapa	Tiempo [hh:mm:ss]
Compresión	8:18:02
Expansión	2:04:30
Completo	10:22:32

El ciclo tiene la misma duración que el CAES convencional, y se debe a que los flujos másicos en la etapa de compresión y expansión se mantiene iguales en las dos simulaciones al igual que las temperaturas de operación de los dispositivos.

Temperaturas

En la tabla 9 se muestran las temperaturas máximas y mínimas que alcanza el sistema en las etapas.

Tabla 12. Temperatura.

Proceso	T mínima en [°C]	T máxima en [°C]
Salida compresor	686,362	908,149
Tanque	25,66	91,106
Salida turbina	179,171	240,514

Como se no se cambió las condicione del intercambiador de calor en el caso convencional, el sistema de almacenamiento tomará la temperatura de salida del intercambiador, como la temperatura de entrada del tanque, la cual será constante como en el modelo convencional, este paso es muy importante, porque si se sube la temperatura en la entrada del tanque, el intercambiador tendrá menos energía para almacenar, por ende, las perdidas por calor serán mayores. Esto ocurre debido a que entre mayor sea la diferencia de temperatura, entre la entrada y la salida en cualquier dispositivo, mayor será el consumo o generación de energía.

Potencias del compresor y la turbina

En la tabla 13 se muestran los resultados de las potencias y energías de la simulación para el compresor y turbina.

Tabla 13. Potencia.

	[kW]
Potencia compresor	390,921
Potencia turbina	1343,521

Las potencias son las mismas que el convencional, y esto se debe a que la potencia depende del flujo y el volumen del depósito, hasta este punto no hay ninguna diferencia con el convencional.

Análisis exerético

Los resultados del balance de exerético están plasmados en la figura (14) y en tabla 14.

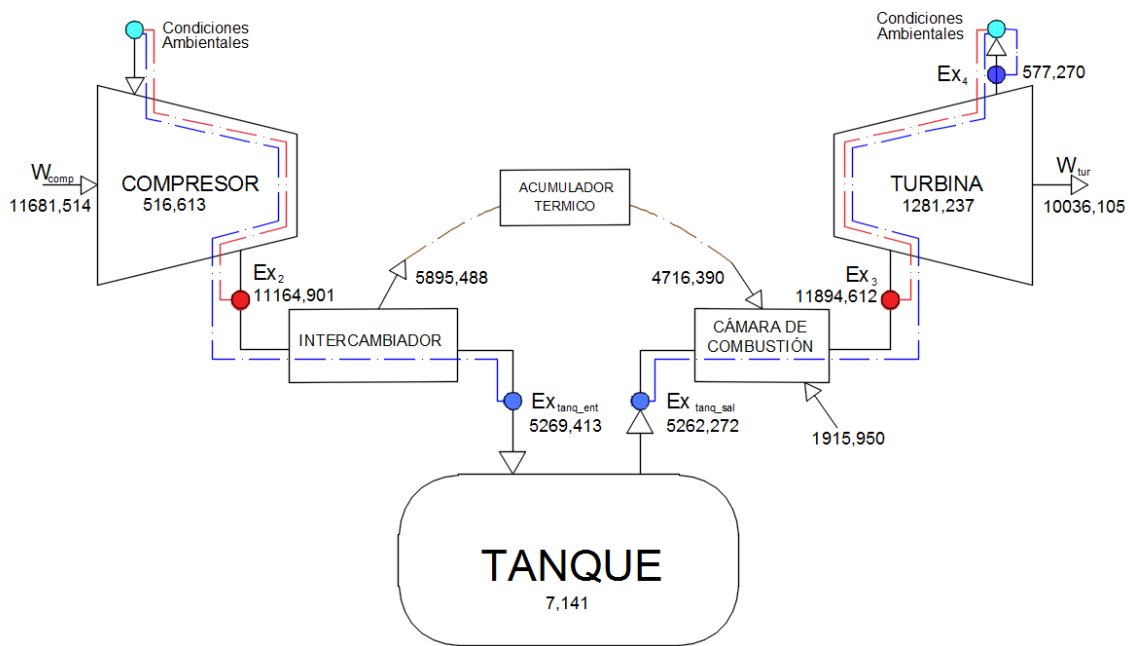


Figura 14. Esquema balance exerético CAES adiabático (valores en MJ)

La figura 14 muestra el flujo del aire y la variación de la exergería en todos los dispositivos.

Tabla 14. Balance exergético.

Etapa		Valor en [MJ]
Compresor	Trabajo consumido	11681,514
	Exergía de salida	11164,901
	Perdidas	516,613
Intercambiador	Exergía por calor:	5895,488
	Exergía recuperada:	4716,390
Tanque	Exergía de entrada:	5269,413
	Exergía de salida:	5262,272
	Perdidas:	7,141
Camara de combustión	Exergía por calor:	1915,950
	Calor de entrada:	3271,172
Turbina	Trabajo generado:	10036,105
	Exergía de entrada:	11894,612
	Exergía salida de gases:	577,270
	Perdidas:	1281,237

La ventaja del sistema adiabático radica en la disminución del consumo de combustible, se observa calor que entrega la cámara de combustión disminuyo, paso de 12232,166 [MJ] en el modelo convencional, a 3271,172 [MJ], una reducción del 73,32%.

En la tabla 15 se muestra la variación de la cámara de combustión, cuando varia la eficiencia del almacenador térmico, y cómo influye en la eficiencia del sistema.

Tabla 15. Comparación eficiencias almacenador térmico

Eficiencia del almacenador térmico	60%	80%	100%
Calor de entrada	5511,420 [MJ]	3271,172 [MJ]	1030,923 [MJ]
Exergía por calor	6632,340 [MJ]	1915,950 [MJ]	6632,340 [MJ]
Eficiencia del sistema	63,52%	72,03%	80,53%

Comprando el sistema adiabático con el convencional se presenta una mejora sustancial en la eficiencia, pasando del 38,01% al 72,03%.

El rendimiento por etapas, la etapa de compresión mejoro, debido a que el calor de refrigeración que antes se desperdiciaba, ahora se aprovecha, pasó de un 45,11% al 85,48%.

5.4 Modelos caes isotérmico

Este proceso consiste en tratar de mantener la temperatura constante desde el principio hasta el final. Existen otros métodos isotérmicos, por ejemplo, el que se realiza con pistones líquidos que transfieren su calor de una forma constante con el fluido, el cual, a su vez en la etapa de expansión, lo intercambia con el aire a una tasa constante, para este trabajo se va a considerar trenes de compresión, y expansión, considerando un caso casi ideal. El esquema de la figura 15 muestra el modelo isotérmico.

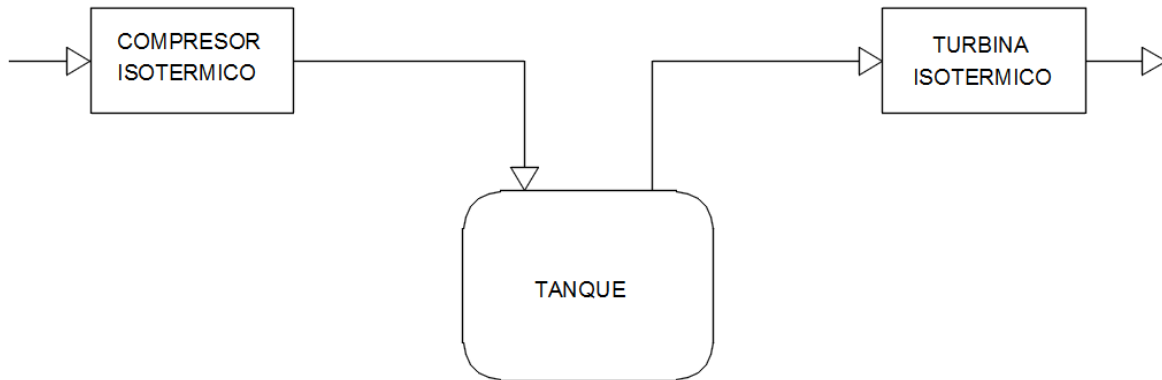


Figura 15. Esquema CAES isotérmico

5.4.1 Parámetros iniciales. En la tabla 16 se muestran los valores de entrada de la simulación.

Tabla 16. Condiciones de entrada

	Parámetro	Valor	Unidades
Condiciones ambientales	T_1	28	[°C]
	p_1	101,325	[kPa]
Compresor	T_1	28	[°C]
	p_1	101,325	[kPa]
	\dot{m}	0,5	[kg/s]
	n_s	0,85	-
Tanque	T_{entrada}	28	[°C]
	p_{max}	8000	[kPa]
	p_{min}	4000	[kPa]
	V	500	[m ³]

	Parámetro	Valor	Unidades
Turbina	T_3	28	[°C]
	\dot{m}	2	[kg/s]
	n_s	0,85	-

5.4.2 Resultados. En la tabla 17 se encuentra el tiempo de simulación de las etapas de compresión y de expansión y el tiempo total de un ciclo. El tiempo del proceso depende del caudal másico de la turbina y el compresor.

Tabla 17. Tiempo

Etapa	Tiempo [HH:mm:ss]
Compresión	11:41:13
Expansión	2:55:18
Completo	14:36:31

Los tiempos en este proceso aumentan debido a que los compresores deben hacer el trabajo con saltos de presiones reducidos con el fin de no causar cambios de temperatura, y como la temperatura se mantiene constante, se debe almacenar más masa dentro del tanque con el fin de llegar a la presión establecida.

Temperaturas y presiones

En la tabla 18 se muestran la eficiencia de este modelo.

Tabla 18. Temperaturas y eficiencia

Entrada y salida compresor [°C]	28
Entrada y salida turbina [°C]	28
Eficiencia	72,19%

La eficiencia obtenida es alta comparada con el convencional, pero no hay una gran diferencia con el adiabático.

Potencias del compresor y la turbina

En la tabla 19 se muestran los resultados de las potencias para el compresor y turbina.

Tabla 191. Potencias

	[Kw]
Potencia del compresor	206,519
Potencia de la turbina	596,341

El consumo en la potencia la etapa de compresión disminuyó un 25,61% al pasar de 390,921 [kW] a 206,519 [kW], comparado con los sistemas convencional y adiabático, la potencia de salida disminuye en un 55,61%, debido a que la temperatura influye en la exergía de los sistemas.

Análisis exerético

La figura 16 y en la tabla 20, se muestra el flujo del aire y la variación de la exergía en todos los dispositivos.

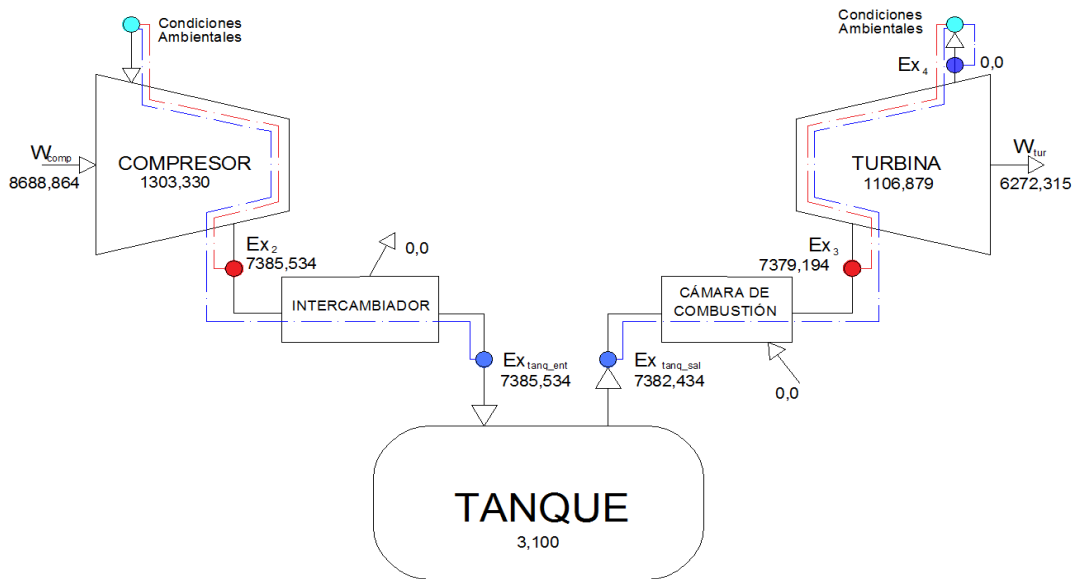


Figura 16. Esquema balance exerético CAES Isotérmico (valores en MJ)

Tabla 20. Balance exerético

Etapa		Valor en [MJ]
Compresor	Trabajo consumido	8688,864
	Exergía de salida	7385,534
	Perdidas	1303,330
Intercambiador	Calor de salida	0,000
	Exergía por calor	0,000
Tanque	Exergía de entrada	7385,534
	Exergía de salida	7382,434
	Perdidas	3,100

Cámara de combustión	Exergía por calor	0,000
Turbina	Trabajo generado	6272,315
	Exergía de entrada	7379,194
	Exergía salida de gases	0,000
	Perdidas	1106,879

Como era de esperarse la etapa de combustión y de almacenamiento son despreciables, lo que más influye en el sistema son las eficiencias de los equipos utilizados.

5.5 Comparación

Para la comparación de los tres sistemas CAES se encuentra en la tabla 21. Se tomaron los valores base de la simulación, solo modificando las condiciones operativas específicas de cada proceso.

Tabla 21. Comparación de los tres sistemas

Parámetro	Convencional	Adiabática	Isotérmica
T max deposito [°C]	91,106	91,106	36,568
Masa en el depósito [kg]	38262.417	38262.417	44999.910
Potencia del compresor [kw]	390,921	390,921	206,519
Energía del compresor [kwh]	3244,865	3244,865	2413,573
Potencia turbina [kw]	1343,521	1343,521	596,341
Energía turbina [kwh]	2787,807	2787,807	1742,310
n_{ei}	38,02% al	72,03%.	72,19%

De los resultados de la tabla 21, se observa que los procesos más eficientes son los adiabáticos e isotérmico, pero con la ventaja que el adiabático tiene una potencia de salida mucho mayor, por la influencia del calor suministrado en la expansión.

Tabla 22. Eficiencias por etapas

Etapas	Convencional	Adiabático	Isotérmico
Compresión	45,11%	85,48%	85,00%
Deposito	99,86%	99,86%	99,96%
Expansión	84,38%	84,38%	84,96%

La tabla 22 muestra las eficiencias por etapa, donde se observa que la etapa de compresión es la que afecta en mayor medida el sistema en el caso convencional, y se debe a las salidas de calor de los compresores, y si el calor es aprovechado o no en la etapa de expansión.

Como en Colombia no existe tarifa diferenciada en el cobro de la energía eléctrica, se tomó como referencia el modelo tarifario de España. La figura (17) muestra el comportamiento del costo de la energía en ese país.

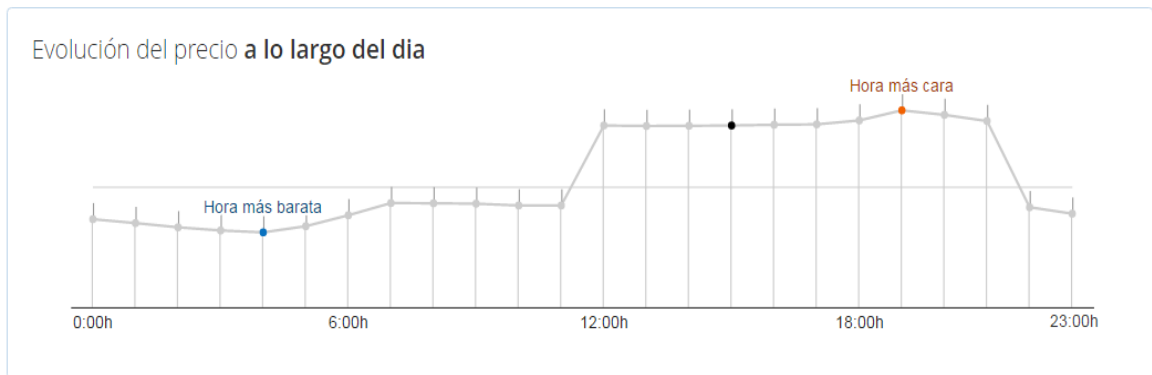


Figura 17. Curva de demanda diaria en España .

Fuente: E. E. X. S. ENDESA ENERGÍA SA, «ENDESA ENERGÍA SA». [En línea]. Disponible en: <https://www.endesaclientes.com/precio-lu>. [Accedido: 09-feb-2017].

En la traba (23) se hizo un balance de los costos asociados en la etapa de compresión y expansión, así como el margen de ganancia, solo involucrando estas dos etapas y sin tener en cuenta los costos asociados de los demás dispositivos.

Para el balance de los costos se tomó el promedio del valor de la energía en las horas valle (14 horas) y las horas pico (10 horas), los cuales son: Horas valle 0,07666 y horas pico 0,154207 esto en [€/KWh].

Tabla 23. Comparación de precios en horas valles y pico

	Convencional	Adiavatico	Isotermico
Compresor [kWh]	3244,87	3244,87	2413,57
Turbina [kWh]	2787,807	2787,807	1742,31
Promedio Hora valle [€/KWh]	248,751	248,751	185,025
Promedio HORA Pico	429,899	429,899	268,676

	Convencional	Adiavatico	Isotermico
[€/KWh]			
Ganancia [€/KWh]	181,148	181,148	83,652
Ganancia [%]	72,82	72,82	45,21

6. Observaciones y conclusiones

Como resultado de la revisión bibliográfica de la tecnología de almacenamiento de energía CAES, se encontró que el almacenamiento en tanques, debido a la cantidad de energía que pueden almacenar no está siendo objeto de investigación, estas están más enfocadas en sistemas a gran escala, como en cavernas subterráneas, y si bien el principio y el comportamiento de los sistemas CAES en tanques o en cavernas subterráneas es similar, el almacenamiento en tanques puede ser una alternativa muy interesante debido a que se puede manejar un rango de presión mayor que las cavernas subterráneas, que dependen de las características de las formaciones geológicas.

En los modelos planteados en este proyecto, se observó que, dependiendo del modelo implementado, puede ser más provechoso tener altas temperaturas, como en el caso adiabático, el cual se basa en el almacenamiento térmico, pero que en los otros sistemas estas altas temperaturas representarían pérdidas.

La simulación en MATLAB del proceso de almacenamiento de energía en tanques arrojó los siguientes resultados:

- Para un proceso CAES convencional se observó que es el sistema con más baja eficiencia comparada con los sistemas adiabático e isotérmico, esto debido a que, la energía térmica que se transfiere en el intercambiador de calor es pérdida para el sistema.

- Para el proceso A-CAES se mejora la eficiencia comparada con el proceso CAES convencional, pues se aprovecha el calor desperdiciado por el intercambiador, esta es la característica que diferencia este sistema con el anterior.

- Para el Proceso I-CAES la eficiencia es mayor que los otros procesos, pero el proceso es más lento y la potencia máxima es menor, esto se debe a que se debe manejar la presión de salida y de entrada constante para no ocasionar cambios de temperatura.

- Estos procesos tienen en común que comprimen, almacenan y expanden el aire, y se diferencian principalmente por realizar este ciclo con distintos procesos termodinámicos.

Este trabajo pretende ser una base teórica a la hora de llevar a cabo futuros proyectos que involucren estos sistemas y dar una herramienta que facilite el modelado o la caracterización de forma general de uno de estos sistemas, ya que la simulación se realizó en un entorno gráfico en Matlab y este queda abierto para realizar infinidad de simulaciones teniendo la posibilidad de cambiar las variables de entrada que impactan el dimensionamiento de cada dispositivo.

Bibliografía

Askeland, D. E.; Fulay, P. P.; y Bhattacharya, D.K. (2010). Fundamentos de ingeniería y ciencia de materiales, Segunda ed. Mexico,D.F.

AzRISE, (2010). «Study of Compressed Air Energy Storage with Grid and Photovoltaic Energy Generation», Arizon Public Serv. Co., n.º August.

C. M. S. (1983). Virgi Moring Faires, TERMODINAMICA, vol. 6a. edición.

Cengel, Y. A.; y Boles, M. A. (2008). «Termodinamica».

Chen, H.; Cong, T. N.; Yang, W.; Tan, C.; Li, Y.; y Ding, Y. (2009). «Progress in electrical energy storage system: A critical review», Prog. Nat. Sci., vol. 19, n.º 3.

De Samaniego Steta, F. (October, 2010). «Modeling of an advanced adiabatic compressed air energy storage (AA-CAES) unit and an optimal model-based operation strategy for its integration into power markets», EEH Power Syst. Lab. Swiss Fed. Inst. ..., n.º.

Donald, E. R.; Kenneth, Wark, (2001). Termodinámica, Sexta. España: McGraw-Hill Inc.

E. E. X. S. ENDESA ENERGÍA SA, «ENDESA ENERGÍA SA». [En línea]. Disponible en: <https://www.endesaclientes.com/precio-lu>. [Accedido: 09-feb-2017].

ENERGY ESTORAGE POWER CORPORATON, «Compressed Air Energy Storage». [En línea]. Disponible en: <http://espcinc.com/>. [Accedido: 15-mar-2016].

Energy Storage Association, «Compressed Air Energy Storage (CAES)», 2016. [En línea]. Disponible en: <http://energystorage.org/energy-storage/storage-technology-comparisons/caes>. [Accedido: 22-abr-2016].

EPRI, (2014). «Compressed Air Energy Storage Demonstration Newsletter», n.º January, pp. 1-10.

EPRI, (2010). «Electric Energy Storage Technology Options - A Primer on Applications, Costs & Benefits», n.º December.

European Union, (2016). «AA-CAES Resultado resumido».

F. D. S. Steta, A. Ulbig, y S. Koch, «A model-based optimal operation strategy for compressed air energy storage (caes) plants».

García Garrido, S. y Fraile Chico, D. (2008). Cogeneración diseño, operación y mantenimiento de plantas de cogeneración, Ediciones. España.

Kim, Y. M.; Lee, J. H.; Kim, S. J.; y Favrat, D. (2012). «Potential and evolution of compressed air energy storage: Energy and exergy analyses», Entropy, vol. 14, n.º 8.

Lluis, J.; y Galán, M. (2012). Termotecnia, Primera Ed. Barcelona.

Luo, X.; Wang, J.; Dooner, M.; Clarke, J.; y Krupke, C. (2014). «Overview of current development in compressed air energy storage technology», Energy Procedia, vol. 62.

Nakhamkin, M.; Chiruvolu, M.; y Daniel, C. (2010). «Available compressed air energy storage (CAES) plant concepts», Energy.

PowerSouth Energía Cooperativa PowerSouth, «Power Plant McIntosh», 2007. [En línea]. Disponible en: http://www.powersouth.com/mcintosh_power_plan. [Accedido: 15-mar-2016].

Succar, S.; y Williams, R. (2008). «Princeton Environmental Institute PRINCETON UNIVERSITY Energy Systems Analysis Group Compressed Air Energy Storage : Theory , Resources , And Applications For Wind Power Acknowledgments», n.º April.

T. MvBride, A. Bell, y D. Kepshire, (2013). «ICAES Innovation: FOAM-Based Heat Exchange».

United Nations, (2015). «Resumen de lo anunciado por líderes mundiales en la COP21», [En línea]. Disponible en: <http://newsroom.unfccc.int/es/paris/resumen-de-los-anuncios-del-dia-de-los-lideres-en-la-cop21/>.

Zunft, S.; Jakiel, C.; Koller, M. y Bullough, C. (October 2006). «Adiabatic Compressed Air Energy Storage for the Grid Integration of Wind Power», Sixth Int. Work. Large-Scale Integr. Wind Power tTransmission Networks Offshore Wind., n.º

Apéndices

Apéndice A. Resultados de simulación

Este anexo contiene los valores obtenidos de la simulación de los tres modelos de sistemas CAES, junto con sus respectivas graficas que describen el comportamiento de las variables físicas tratadas en este proyecto (temperatura, presión, masa y energía)

Resultados modelo CAES convencional

La tabla 24 contiene los resultados de la simulación del sistema CAES convencional, en ella se encuentra los valores de trabajo, energía, exergía, temperatura, presión y masa para cada uno de los dispositivos que conforman este modelo.

Tabla 2. Resultados simulación CAES convencional.

CONVENCIONAL			
COMPRESOR		CAMARA DE COMBUSTIÓN	
Trabajo consumido:	11681,514 [MJ]	Calor de entrada:	12232,166 [MJ]
Exergía de salida:	11164,901 [MJ]	Exergía por calor:	6632,340 [MJ]
Perdidas:	516,613 [MJ]	TURBINA	
Energía total:	3244,865 [kWh]	Trabajo generado:	10036,105 [MJ]
Potencia consumida:	390,921 [kW]	Exergía de entrada:	11894,612 [MJ]
Temperatura máxima:	908,149 [°C]	Exergía salida de gases:	577,270 [MJ]
Temperatura mínima:	686,362 [°C]	Perdidas:	1281,237 [MJ]

CONVENCIONAL			
COMPRESOR		CAMARA DE COMBUSTIÓN	
INTERCAMBIADOR		Energía total:	2787,807 [kWh]
Calor de salida:	11201,242 [MJ]	Potencia generada:	1343,521 [kW]
Exergía por calor:	5895,488 [MJ]	Temperatura máxima de salida:	240,514 [°C]
TANQUE		Temperatura mínima de salida:	179,171 [°C]
Temperatura máxima:	91,106 [°C]	EFICIENCIAS POR ETAPAS	
Temperatura mínima:	25,660 [°C]	Eficiencia de compresión:	45,11%
Presión máxima:	8000,021 [kPa]	Eficiencia del depósito:	99,86%
Presión mínima:	3999,970 [kPa]	Eficiencia de expansión:	84,38%
Masa máxima:	38262,417 [kg]	EFICIENCIA TOTAL	
Masa mínima:	23320,917 [kg]	Eficiencia Exergética:	38,01%
Energía máxima:	10000,035 [MJ]		
Energía mínima:	4999,920 [MJ]		
Exergía de entrada:	5269,413 [MJ]		
Exergía de salida:	5262,272 [MJ]		
Perdidas:	7,141 [MJ]		

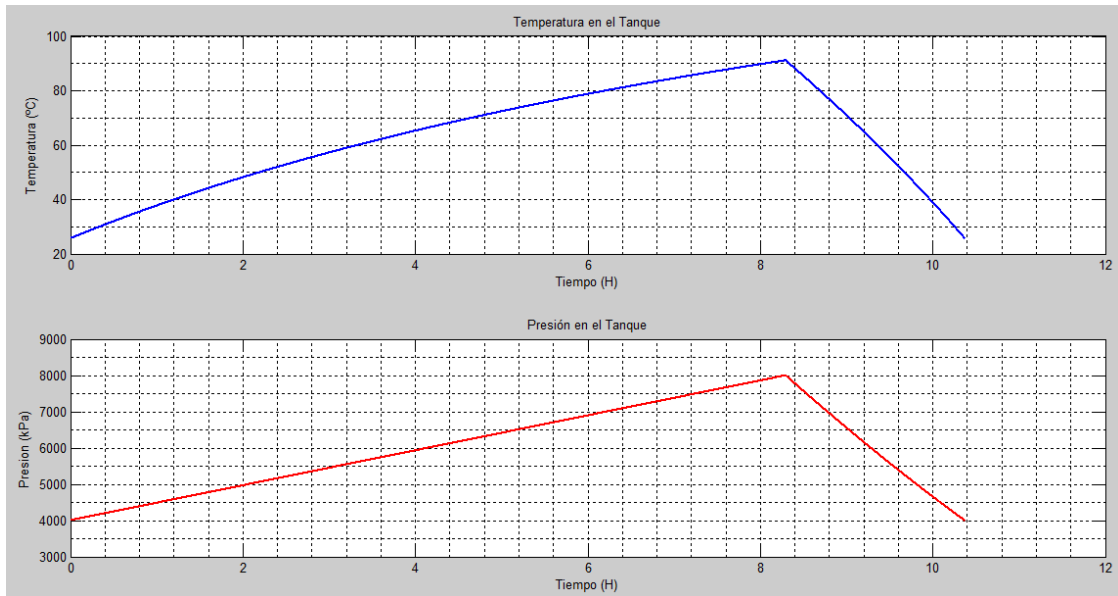


Figura 1. Evolución de la temperatura y la presión dentro del tanque en un ciclo completo CAES convencional

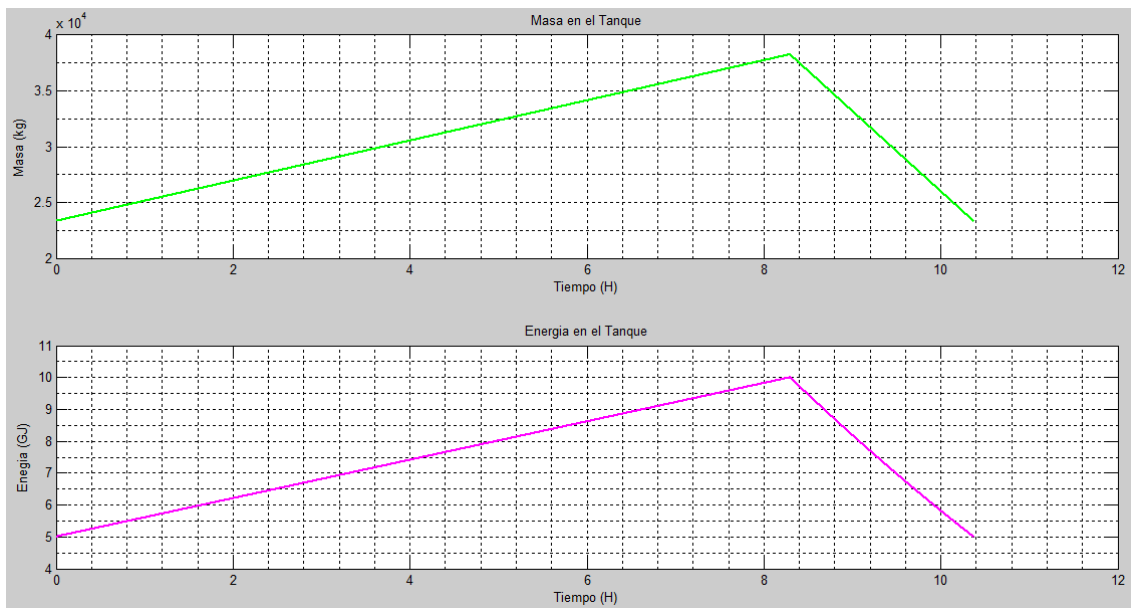


Figura 2. Evolución de la masa y la energía dentro del tanque en un ciclo completo CAES convencional

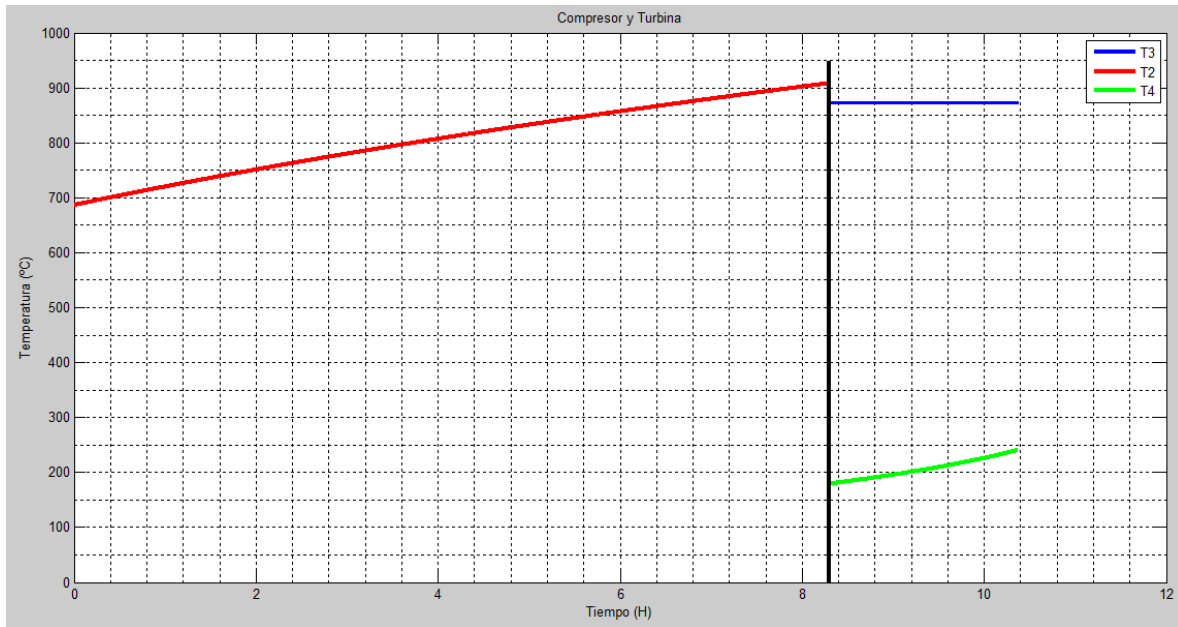


Figura 3. Evolución de la temperatura en el compresor y la turbina, CAES convencional

Resultados modelo CAES convencional.

La tabla 25 contiene los resultados de la simulación del sistema CAES adiabático, en ella se encuentra los valores de trabajo, energía, exergía, temperatura, presión y masa para cada uno de los dispositivos que conforman este modelo.

Tabla 3. Resultados simulación CAES adiabático.

ADIABATICO			
COMPRESOR		CAMARA DE COMBUSTIÓN	
Trabajo consumido:	11681,514 [MJ]	Calor de entrada:	3271,172 [MJ]
Exergía de salida:	11164,901 [MJ]	Exergía por calor:	6632,340 [MJ]
Perdidas:	516,613 [MJ]	TURBINA	
Energía total:	3244,865 [kWh]	Trabajo generado:	10036,105 [MJ]
Potencia consumida:	390,921 [kW]	Exergía de entrada:	11894,612 [MJ]

Temperatura máxima:	908,149 [°C]	Exergía salida de gases:	577,270 [MJ]
Temperatura mínima:	686,362 [°C]	Perdidas:	1281,237 [MJ]
INTERCAMBIADOR		Energía total:	2787,807 [kWh]
Exergía por calor:	5895,488 [MJ]	Potencia generada:	1343,521 [kW]
Exergía recuperada:	4716,390 [MJ]	Temperatura máxima de salida:	240,514 [°C]
TANQUE		Temperatura mínima de salida:	179,171 [°C]
Temperatura máxima:	91,106 [°C]	EFICIENCIAS POR ETAPAS	
Temperatura mínima:	25,660 [°C]	Eficiencia de compresión:	85,48%
Presión máxima:	8000,021 [kPa]	Eficiencia del depósito:	99,86%
Presión mínima:	3999,970 [kPa]	Eficiencia de expansión:	84,38%
Masa máxima:	38262,417 [kg]	EFICIENCIA TOTAL	
Masa mínima:	23320,917 [kg]	Eficiencia Exergética:	72,03%
Energía máxima:	10000,035 [MJ]		
Energía mínima:	4999,920 [MJ]		
Exergía de entrada:	5269,413 [MJ]		
Exergía de salida:	5262,272 [MJ]		
Perdidas:	7,141 [MJ]		

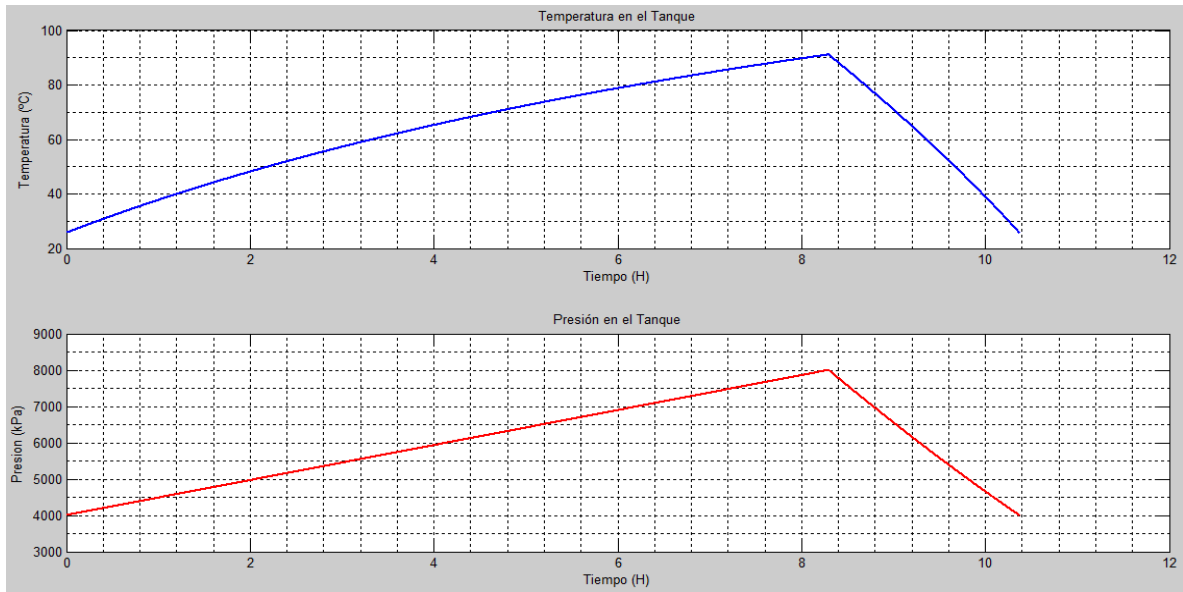


Figura 4. Evolución de la temperatura y la potencia dentro del tanque en un ciclo completo CAES adiabático

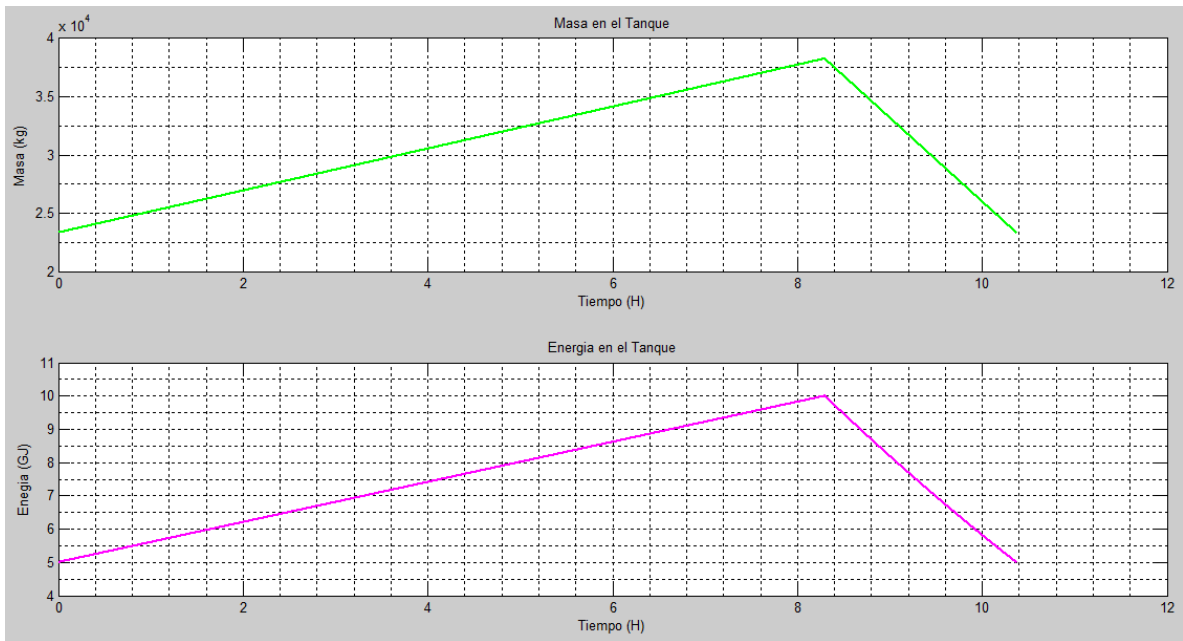


Figura 5. Evolución de la masa y la energía dentro del tanque en un ciclo completo CAES adiabático

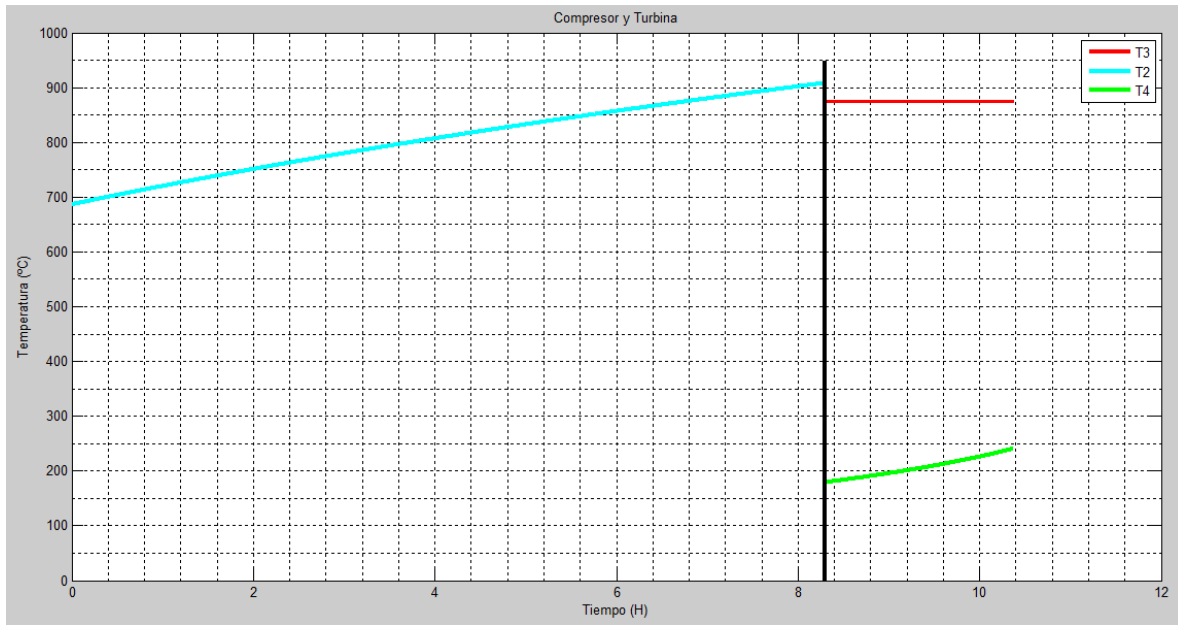


Figura 6. Evolución de la temperatura en el compresor y la turbina, CAES adiabático

Resultados modelo CAES isotérmico.

La tabla 26 contiene los resultados de la simulación del sistema CAES adiabático, en ella se encuentra los valores de trabajo, energía, exergía, temperatura, presión y masa para cada uno de los dispositivos que conforman este modelo.

Tabla 4. Resultados simulación CAES isotérmico.

ISOTERMICO			
COMPRESOR		CAMARA DE COMBUSTIÓN	
Trabajo consumido:	8688,864 [MJ]	Calor de entrada:	0,058 [MJ]
Exergía de salida:	7385,534 [MJ]	Exergía por calor:	0,000 [MJ]
Perdidas:	1303,330 [MJ]	TURBINA	
Energía total:	2413,573 [kWh]	Trabajo generado:	6272,315 [MJ]
Potencia consumida:	206,519 [kW]	Exergía de entrada:	7379,194 [MJ]

Temperatura máxima:	28,000 [°C]	Exergía salida de gases:	0,000 [MJ]
Temperatura mínima:	28,000 [°C]	Perdidas:	1106,879 [MJ]
INTERCAMBIADOR		Energía total:	1742,310 [kWh]
Calor de salida:	0,000 [MJ]	Potencia generada:	596,341 [kW]
Exergía por calor:	0,000 [MJ]	Temperatura máxima de salida:	28,000 [°C]
TANQUE		Temperatura mínima de salida:	28,000 [°C]
Temperatura máxima:	36,568 [°C]	EFICIENCIAS POR ETAPAS	
Temperatura mínima:	17,653 [°C]	Eficiencia de compresión:	85,00%
Presión máxima:	8000,007 [kPa]	Eficiencia del depósito:	99,96%
Presión mínima:	3999,925 [kPa]	Eficiencia de expansión:	84,96%
Masa máxima:	44999,910 [kg]	EFICIENCIA TOTAL	
Masa mínima:	23962,910 [kg]	Eficiencia Exergético:	72,19%
Energía máxima:	40000,043 [MJ]		
Energía mínima:	19999,582 [MJ]		
Exergía de entrada:	7385,534 [MJ]		
Exergía de salida:	7382,434 [MJ]		
Perdidas:	3,100 [MJ]		

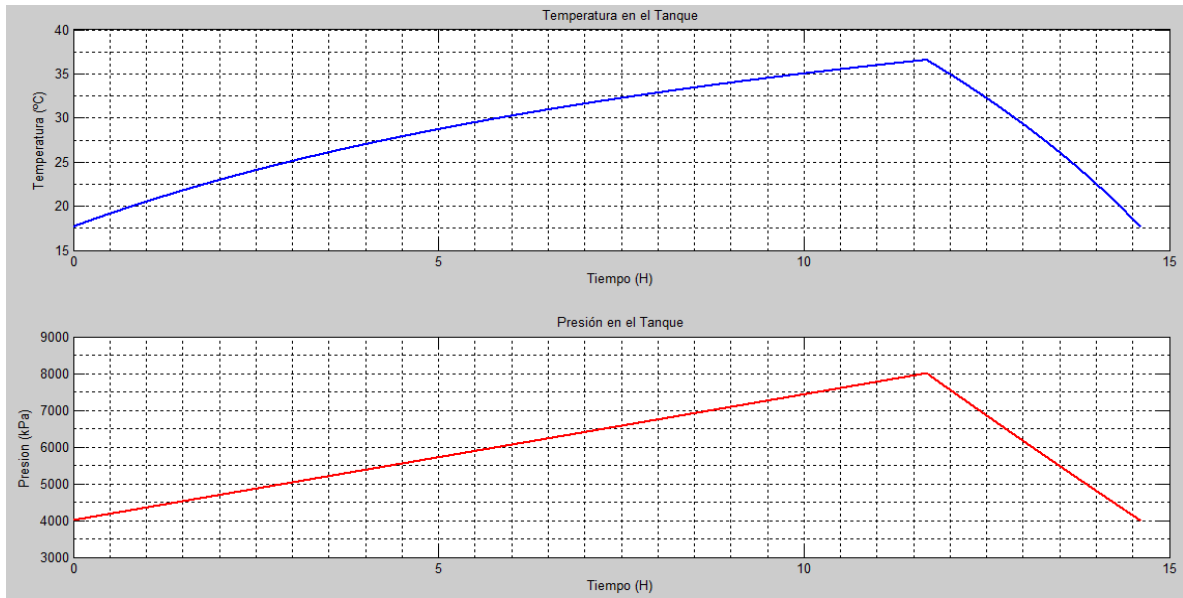


Figura 7. Evolución de la temperatura y la potencia dentro del tanque en un ciclo completo CAES isotérmico

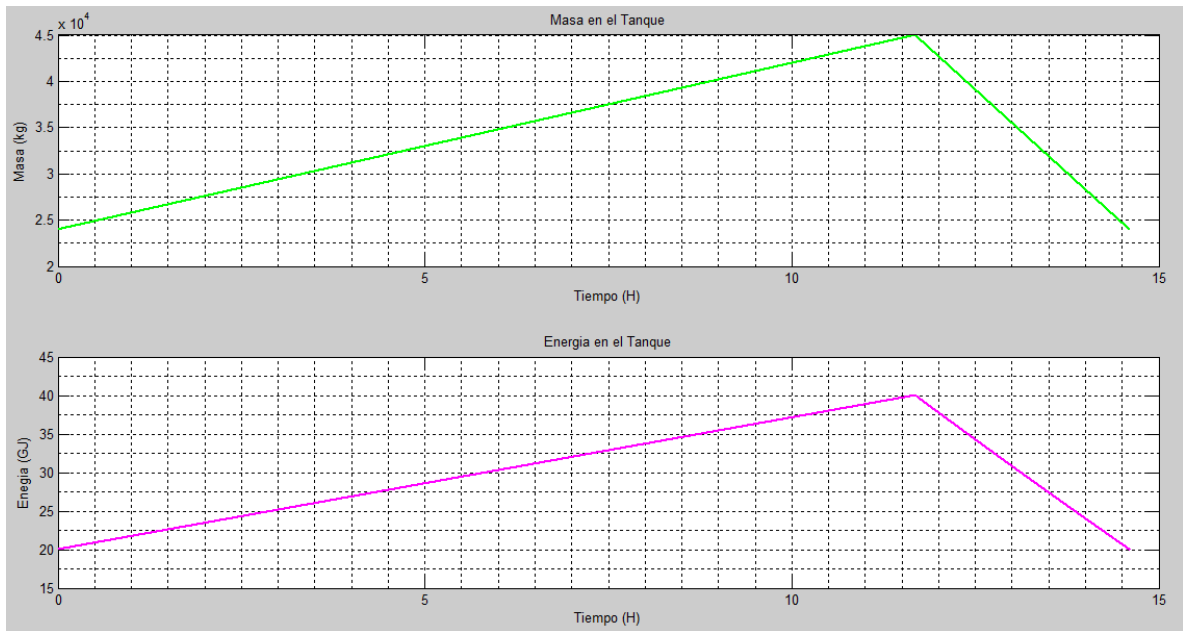


Figura 8. Evolución de la masa y la energía dentro del tanque en un ciclo completo CAES isotérmico

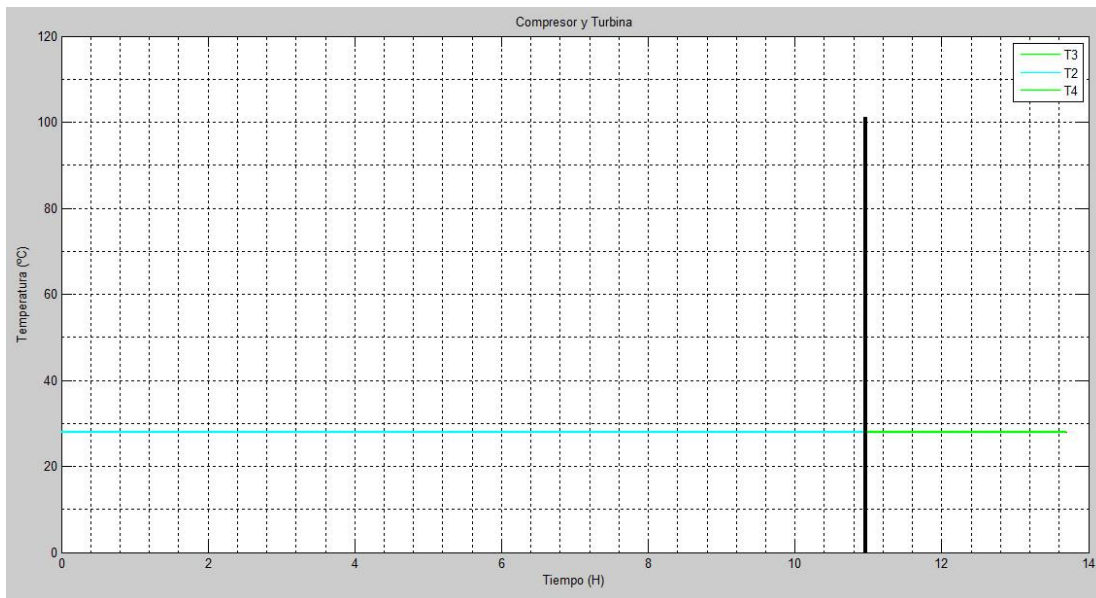


Figura 9. Evolución de la temperatura en el compresor y la turbina, CAES isotérmico

Apéndice B. Manual de usuario

A continuación, se describirá cómo funciona el entorno gráfico de simulación y las partes que lo componen. En las figuras (28) y (29) se representan los sistemas CAES Adiabático e Isotérmico como base para explicar el funcionamiento del entorno de simulación.

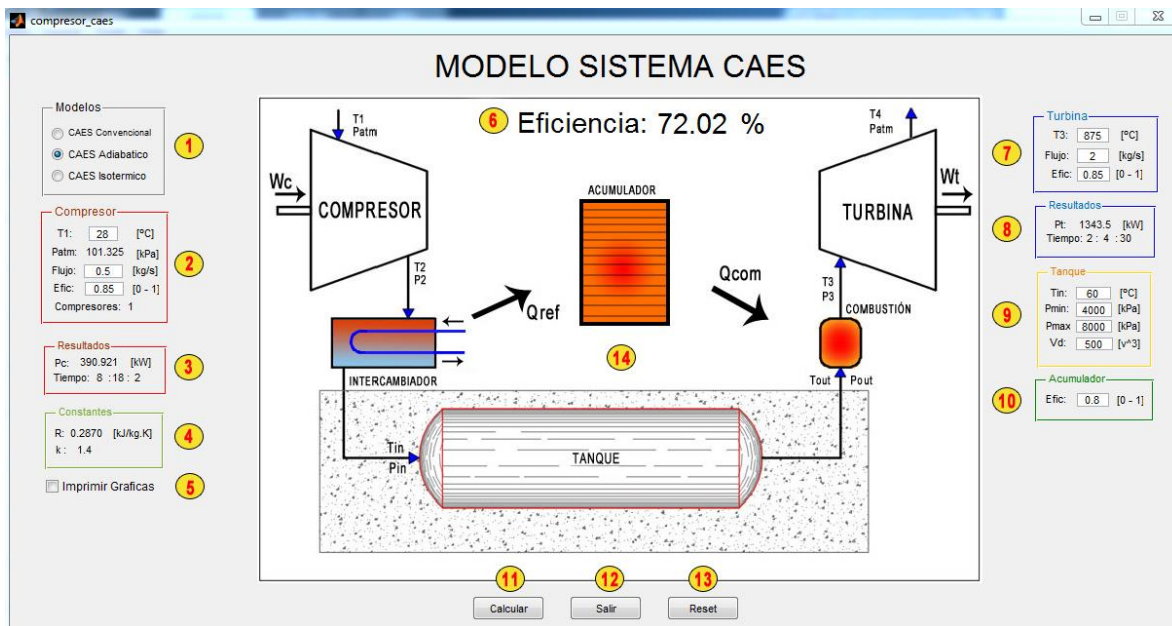


Figura 10. Entorno gráfico de simulación

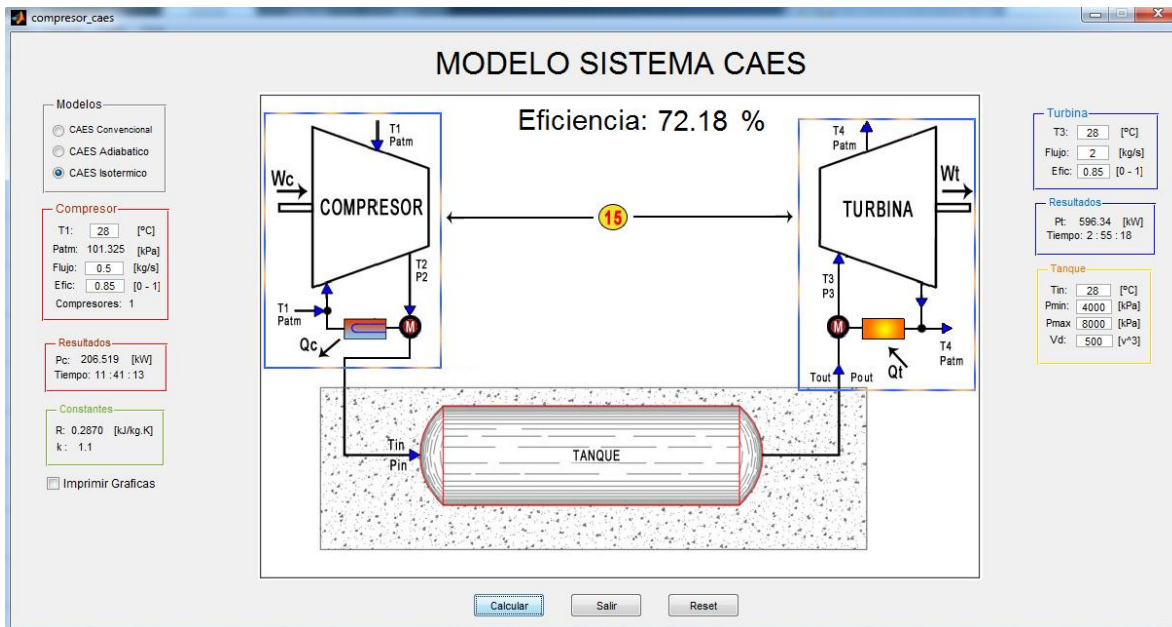


Figura 11. Entorno gráfico de simulación isotérmico.

En la tabla (27) se describe cada uno de los ítems.

Tabla 5. Descripción parámetros de simulación.

Ítem	Descripción
1	Panel para escoger el modelo CAES que se desea simular
2	Panel de las condiciones de simulación del compresor
3	Panel donde se imprimen dos resultados (tiempo de compresión y potencia del compresor)
4	Constantes de aire utilizadas en la simulación
5	Casilla para imprimir o no graficas de simulación
6	Texto que aparece cuando la simulación termina e imprime la eficiencia del modelo CAES
7	Panel para las condiciones de simulación de la turbina
8	Panel donde se imprimen dos resultados (tiempo de expansión y potencia de la turbina)
9	Panel de las condiciones de simulación del tanque
10	Panel para la eficiencia del acumulador térmico (Solo aparece cuando se escoge esta opción)
11	Botón para empezar la simulación
12	Botón que cierra el entorno grafico

Ítem	Descripción
13	Botón que resetea los valores de los ítems 3, 6 y 8
14	Figura que cambia en función del modelo que se escoja en el ítem 1 y que representa el sistema CAES simular
15	Frontera o superficie de control de la turbina y el compresor

El ítem 15 de la figura (24) representa la frontera (Superficie de control) del compresor y la turbina, los elementos dentro de esta frontera hacen parte de estos dispositivos (compresor y turbina) y no representan modelos separados.

Todos los resultados son impresos en la pantalla principal de Matlab.

Archivos de programación

Las figuras (25) y (26) y la tabla 28 se encuentran el conjunto de archivos que hacen posible la simulación.



Figura 12. Archivos simulación

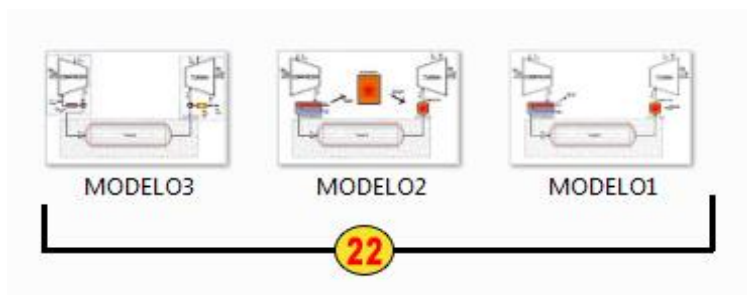


Figura 13. Imágenes de simulación

Tabla 6. Archivos de simulación

Ítem	Descripción
16	Archivo. fig
17	Archivo .m del modelo isotérmico
18	Archivo .m del modelo adiabático
19	Archivo .m del modelo convencional
20	Archivo .m que calcula las condiciones iniciales del tanque para cada modelo
21	Archivo .m principal de simulación
22	Imágenes necesarias que representan cada modelo CAES