

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de la Energía

ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS PARA SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO CAES

Autor: Joaquín Oliva Castro

Tutores: Isidoro Lillo Bravo

José Antonio López Álvarez

Dpto. Ingeniería Energética

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de la Energía

ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS PARA SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO CAES

Autor:

Joaquín Oliva Castro

Tutores:

Isidoro Lillo Bravo

José Antonio López Álvarez

Dpto. de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024

Trabajo Fin de Grado: Análisis de alternativas para sistemas de almacenamiento CAES

Autor: Joaquín Oliva Castro

Tutores:

Isidoro Lillo Bravo

José Antonio López Álvarez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2024

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que, de una forma u otra, han contribuido a la culminación de este Trabajo de Fin de Grado.

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres, Elisa Castro Jiménez y Ambrosio Oliva Martínez por su incondicional apoyo y comprensión a lo largo de estos años. Gracias por enseñarme la importancia de continuar los estudios. Gracias por creer en mí y darme la fuerza necesaria para seguir adelante en los momentos más difíciles.

En segundo lugar, me gustaría agradecer a mi pareja, por ser la persona que más ha aguantado mis momentos de inseguridad y mis decaídas. Por ser la que siempre ha estado a mi lado apoyándome en todas y cada una de mis decisiones y de ayudarme cuando más lo necesito. Gracias por aguantarme siempre.

También quiero agradecer a mis amigos, a los de siempre y a los que he ido conociendo a mi paso por el grado, quienes han sido una fuente constante de motivación y compañía durante esta etapa. Gracias por compartir conmigo innumerables momentos de estudio, risas y penurias.

Finalmente, quiero expresar mi profunda gratitud a mi tutor de TFG, el Profesor Isidoro Lillo Bravo. Gracias por su orientación, paciencia y valiosos consejos. Su guía experta y su dedicación han sido cruciales para el desarrollo y la finalización de este proyecto. Agradezco enormemente su confianza en mí y su compromiso con mi formación académica y profesional.

Resumen

El presente proyecto estudia el proceso de almacenaje del fluido de trabajo de la tecnología CAES (Almacenamiento energético mediante el almacenamiento de aire comprimido).

El proyecto se dividirá en dos bloques, el primero a modo de introducción pondrá en contexto sobre la actualidad del mercado energético y del uso de diferentes tecnologías de almacenamiento centrándose en la tecnología protagonista de este TFG, la tecnología CAES. Una vez se tenga en contexto lo anteriormente comentado se iniciará con una revisión bibliográfica sobre la tecnología CAES, todo para poder entender mejor el funcionamiento de la misma y de cómo están conectados todos y cada uno de sus componentes desde el punto de vista termodinámico; se le dará una pequeña introducción seguida de un estudio de los principales elementos que la componen así como un análisis termodinámico del ciclo termodinámico correspondiente a esta tecnología así como de sus variantes.

El segundo bloque y núcleo de este trabajo de fin de grado, es el análisis termodinámico del proceso de almacenaje del aire comprimido en el cual se estudiarán diferentes parámetros termodinámicos como es: presión, temperatura, composición de agua y caudal. Se analizarán cada una de ellas independientemente haciendo uso de softwares como el Refprop para el cálculo de propiedades termodinámicas y Excel como calculadora para los diferentes parámetros de estudio y su representación.

Por último se hará una conclusión explicando la importancia de cada uno de esos parámetros independientemente y combinados entre ellos.

Abstract

This project studies the process of storing the working fluid of the CAES technology (Energy Storage through Compressed Air Storage).

The project will be divided into two blocks, the first as an introduction will put into context the current situation of the energy market and the use of different storage technologies, focusing on the main technology of this TFG, the CAES technology. Once the above is put into context, we will begin with a literature review on CAES technology, all in order to better understand how it works and how each and every one of its components are connected from the thermodynamic point of view; You will be given a short introduction followed by a study of the main elements that compose it, as well as a thermodynamic analysis of the thermodynamic cycle corresponding to this technology as well as its variants.

The second block and core of this final degree project is the thermodynamic analysis of the compressed air storage process in which different thermodynamic parameters such as: pressure, temperature, water composition and flow rate will be studied. Each of them will be analyzed independently using softwares such as Refprop for the calculation of thermodynamic properties and Excel as a calculator for the different study parameters and their representation.

Finally, a conclusion will be made explaining the importance of each of these parameters independently and in combination with each other.

Índice

Agradecimientos.....	8
Resumen	10
Abstract.....	11
Índice	12
Índice de Ilustraciones.....	13
Índice de Tablas.....	14
1 ACRÓNIMOS	1
2 INTRODUCCIÓN.....	2
3 TECNOLOGÍA CAES	6
4 COMPONENTES	11
Compresores.	11
Turbinas.	12
Intercambiadores de calor.	13
Almacenamiento de aire.	14
Almacenamiento térmico.	15
Cámara de combustión.....	17
5 MICRO-CAES.....	20
6 TERMODINÁMICA DEL CICLO	21
7 APLICACIONES REALES	26
7.1 HYDROSTOR TORONTO.	26
7.2 KRAFTWERK, HUNTORF.....	27
8 . ANÁLISIS TERMODINÁMICO DEL PROCESO DE ALMACENAMIENTO CON AIRE SECO	29
8.1 Trabajo límite termodinámico.....	33
8.2 Energía almacenada.	37
8.3 Propiedades del fluido dentro de la membrana.....	39
9 . ANÁLISIS TERMODINÁMICO DEL PROCESO DE ALMACENAJE CON AIRE HÚMEDO.....	42
9.1 Trabajo Límite Extraíble y Energía Almacenada.....	47

9.2	EFEECTO DE BLOQUEO Y BOMBEO EN TURBINAS	48
9.3	Comparación proceso volumen constante y presión constante.	49
10	CONCLUSIÓN.....	52
11	REFERENCIAS	54

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1.	Clasificación consumo de energía primaria. [7].....	3
Ilustración 2.	Generación de energía actual.[20].....	4
Ilustración 3.	Clasificación de almacenamiento energético.[1].....	4
Ilustración 4.	Esquema básico CAES. [19].	7
Ilustración 5	Esquema básico del sistema DCAES. [19].	8
Ilustración 6	Esquema básico del sistema ACAES. [19].....	9
Ilustración 7	Esquema básico del sistema ICAES.[19].	10
Ilustración 8.	Ciclo Brayton refrigeración.....	12
Ilustración 9.	Esquema almacenamiento térmico de Thomasson et.....	15
Ilustración 10.	Esquema cámara de combustión con referencia en Sistemas de producción de potencia por la Universidad de Sevilla.	17
Ilustración 11.	Tipología cámara de combustión con referencia en Sistemas de producción de potencia por la Universidad de Sevilla.	18
Ilustración 12.	Representación ciclo Brayton.....	21
Ilustración 13.	Representación tecnologías CAES	22
Ilustración 14.	Representación ciclo CAES y AA-CAES	23
Ilustración 15	Reservorio de aire en forma de globos. Con referencia en https://ecoinventos.com/hydrostor/	26
Ilustración 16.	Proceso de expansión.	33
Ilustración 17	Trabajo límite extraíble por unidad de volumen.....	36
Ilustración 18	Variación de densidad en función de la presión y de la temperatura.....	36
Ilustración 19	Energía Almacenada por el fluido	38
Ilustración 20	Variación V_{esp} CO ₂ saturado.....	41
Ilustración 21	Trabajo límite extraíble del aire húmedo.....	47
Ilustración 22	Energía almacenada del aire húmedo.	47
Ilustración 23	Curva característica de turbinas. Con referencia en Politropía: Regulación de la potencia en turbinas de gas de eje doble a régimen constante.....	49

Índice de Tablas

Tabla 1 Condiciones operacionales de la planta con referencia en More than 20 years of successful operation por Fritz Crotagino.....	27
Tabla 2 Propiedades termodinámicas a 25°C.....	30
Tabla 3 Propiedades termodinámicas a 100°C.....	31
Tabla 4 Propiedades termodinámicas a 200°C.....	32
Tabla 5 Propiedades termodinámicas a 400°C.....	32
Tabla 6 Resultados de los trabajos límites calculados.....	35
Tabla 7 Resultados de la energía almacenada calculada.	38
Tabla 8. Propiedades del CO ₂ saturado	41
Tabla 9 Fracción molar de los componentes del aire húmedo según la humedad relativa.	43
Tabla 10 Propiedades termodinámicas a del aire húmedo con un 60% de humedad relativa.	44
Tabla 11 Propiedades termodinámicas a del aire húmedo con un 50% de humedad relativa	45
Tabla 12 Propiedades termodinámicas a del aire húmedo con un 40% de humedad relativa	45
Tabla 13 Propiedades termodinámicas a del aire húmedo con un 30% de humedad relativa	46
Tabla 14 Comparación proceso de presión constante y volumen constante por unidad de volumen.	50
Tabla 15 Comparación proceso de presión constante y volumen constante para el ejemplo.	51
Tabla 16 Ejemplo de la acción de la presión.	53
Tabla 17 Ejemplo de la acción de la presión.	53

1 ACRÓNIMOS

Um	Energía Interna molar
ex,a	Exergía molar de un flujo
ex,c	Exergía molar de un sistema cerrado
EA	Energía almacenada
Wx	Trabajo límite termodinámico
m	Masa
vc	Volumen de control
ref	Referencia
ρ	Densidad
v	Volumen específico
φ	Humedad relativa
P	Presión
T	Temperatura
x	Fracción másica
dS^U	Variación de entropía del universo
T^E	Temperatura del ambiente

2 INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia de la humanidad, el sector energético ha desempeñado un papel fundamental tanto en la vida cotidiana de las personas como en la evolución de la especie humana. Desde elementos tan simples como una bombilla hasta sistemas complejos de generación de energía, como plantas térmicas de carbón o centrales nucleares.

En los últimos años, el sector energético ha sido un tema candente para la política mundial, el aumento de población, de la economía y de las mejoras en los estándares de vida ha provocado que la demanda energética se haya incrementado de una forma descomunal, esto junto a otros asuntos está provocando lo que se conoce como cambio climático y para ello, se realizó la cumbre de París en 2015 donde se impusieron una serie de objetivos a cumplir por todos y cada uno de los países allí presentes. Estos objetivos eran bajar las emisiones de gases de efecto invernadero para 2030 en un 45% con respecto a las emitidas en 2010 siendo éstas 0% en 2050, limitar el calentamiento global en 1.5% para 2050 y obtener un mix energético en el consumo mundial entre otras cosas.

Debido a esto comenzó un concepto llamado transición energética a una producción de energía más renovable que la que había antes, reduciendo el consumo de combustibles fósiles como el petróleo y el carbón y así aumentar la producción de energía mediante energías renovables como la fotovoltaica o la eólica. La Ilustración 1 muestra la evolución del consumo de energía primaria desde 1970 hasta la actualidad y las previsiones que se tienen hasta 2040.

En la Ilustración 1. Clasificación consumo de energía primaria. [7]., empezando por la izquierda, se puede observar el consumo de energía según el sector, teniendo un aumento en todos y cada uno de ellos, lo mismo pasa con la gráfica de en medio que representa el consumo de energía primaria en cada una de las regiones más consumidoras y grandes del mundo, esta gráfica es interesante ya que podemos observar que países como India o continentes como África van a tener un aumento significativo en su consumo debido a que son regiones emergentes en plena expansión económica y energética mientras que países como China o la OECD (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos) aumentarán hasta que llegue un punto en el que se mantendrán constantes debido a factores como el aumento de la eficiencia energética y que el aumento de la población mundial va a alcanzar un máximo en 2030. Por otro lado, se puede observar la evolución del consumo de los combustibles utilizados como energía primaria gracias al trabajo de todo el mundo, aunque combustibles como el carbón o el gas natural seguirá aumentando, este crecimiento se verá amainado llegando incluso hasta casi pararse como en el caso del petróleo, esto es debido al crecimiento de su contraparte, las energías renovables.

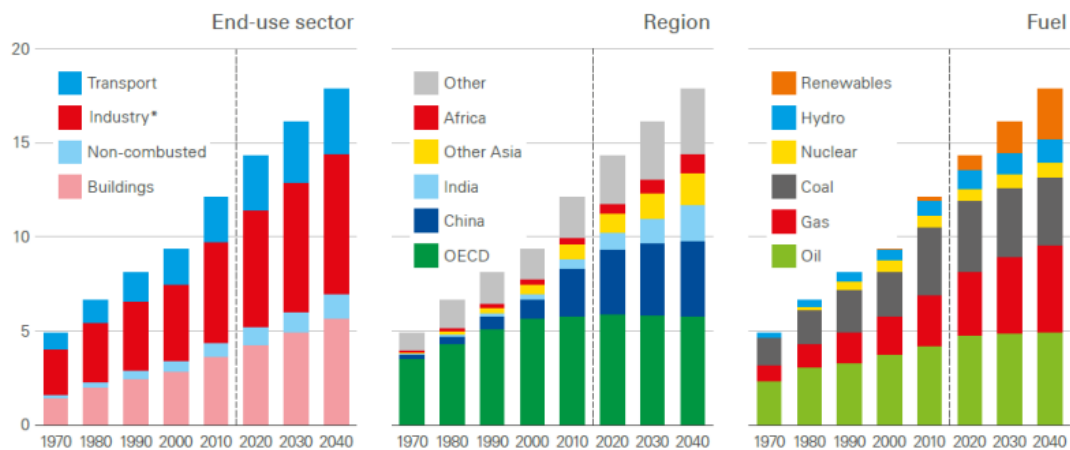


Ilustración 1. Clasificación consumo de energía primaria. [7].

Aunque los objetivos sean prometedores la actualidad es otra, la realidad es que la aportación de petróleo, gas y carbón como energía primaria mundial es del 80%, el calentamiento global actualmente se estima en un 1.2°C sienta un margen de 0.3°C lo único que queda hasta la fecha estipulada, el mix energético depende de la economía y de los recursos naturales de cada país. Debido a esto y a sucesos no programados como el Covid-19 y la guerra entre Ucrania y Rusia que han provocado no solo un aumento del precio de la energía y de los combustibles, si no una inflación a gran escala, no es difícil darse cuenta de la inestabilidad energética que se tiene actualmente en una multitud de países como España, un crecimiento continuo de un miedo hacia una recesión económica no deseada e inseguridades alimentarias que afectan a muchos países.

No todo es malo, si bien es cierto que los objetivos propuestos por la cumbre de París no están yendo según lo planeado, la descarbonización de las industrias es un hecho que se está realizando, la ralentización del calentamiento global, aunque no como se quisiera, también es una realidad. La transición energética en estos últimos años se ha acelerado debido a todos los sucesos anteriormente contados y más, cada vez más países están concienciándose a una energía más renovables, las nuevas tecnologías así como las nuevas estrategias de eficiencia energética van por muy buen camino y un factor muy importante debido a ese crecimiento del consumo de energía primaria renovable es el almacenamiento energético en el cual se está invirtiendo mucho dinero y es un factor clave para que esa transición energética pueda llevarse a cabo.

Pongamos de ejemplo España, la Ilustración 2 permite observar la generación eléctrica actual, si la comparamos curvas antiguas, esto son grandes números teniendo una aportación del 42% de la energía eólica y más de un 50% de aportación renovable a la producción nacional, así como un 83% de generaciones libre de emisiones nacional. España es solo uno de los muchos países que están trabajando duro para que la transición energética sea una realidad.

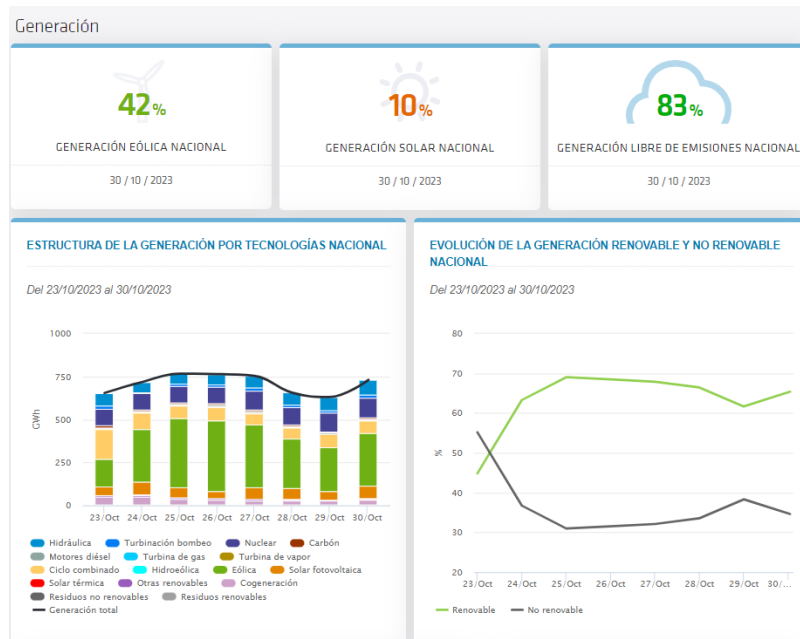


Ilustración 2. Generación de energía actual.[20].

Debido a ese aumento de la producción de energía renovable, factores como el almacenamiento energético es clave para este sector. Debido a las altas perturbaciones que sufre este método de generación de energía ya que dependen de las condiciones climatológicas de su entorno, la calidad de su generación baja y la incertidumbre que provocan no es poca. Existen varios métodos para evitar que estas perturbaciones afecten en gran medida la estabilidad de la red eléctrica, desde métodos como el curtailment, utilización de elementos facts como los statcom para la regulación de reactiva en el punto de interconexión hasta sistemas sofisticados de almacenamiento de energía que de lo que se va a tratar en profundidad a continuación.

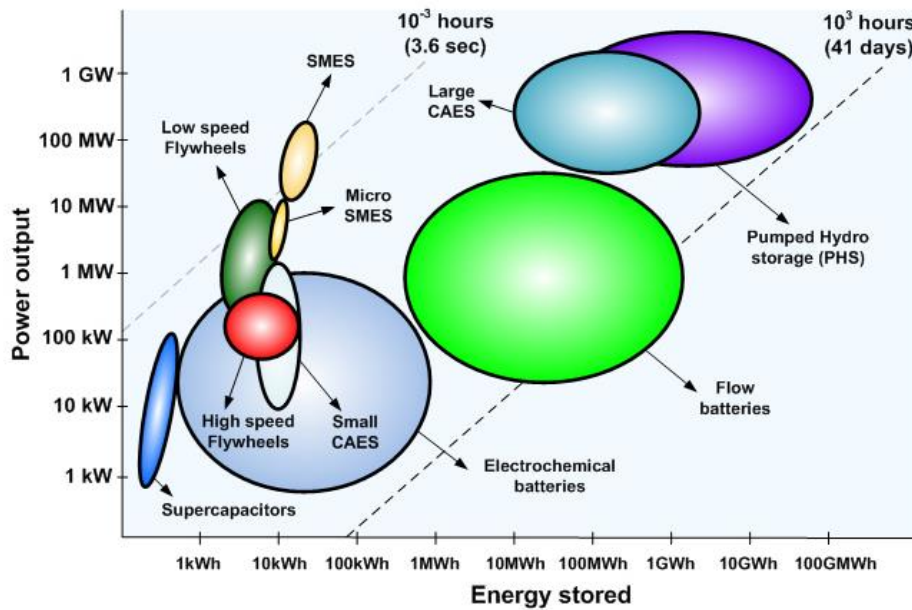


Ilustración 3. Clasificación de almacenamiento energético.[1].

La Ilustración 3 muestra una clasificación para los sistemas de almacenamiento energético dependiendo de sus rangos de potencia y de energía que es capaz de almacenar, desde sistemas como los supercondensadores que se caracterizan por tener una gran capacidad de respuesta debido al alto rango de potencia con el que trabajan pero una baja energía que son capaces de almacenar hasta sistemas como las centrales hidráulicas de bombeo que nos permite tener una gran cantidad de energía almacenada y además, una potencia elevada.

[1] Cada sistema tiene sus ventajas y sus desventajas, a continuación, se mostrará una breve comparativas entre algunos de los principales sistemas de almacenamiento.

SUPERCONDENSADORES

Los supercondensadores tienen un funcionamiento muy parecido a los condensadores ordinarios teniendo los mismos tiempos de carga y descarga, donde reside la belleza de esta tecnología es en la capacidad de almacenar energía, aunque poca, a un voltaje muy alto.

Esta característica es muy utilizada en electrónica debido a que es capaz de regular la tensión de lo que está conectado excelentemente y permite una mayor seguridad de dichos elementos, también es utilizado en tecnologías como la eólica que están sujetas a continuas perturbaciones y estos sistemas son capaces de una mayor regulación de interconexión a red.

VOLANTES DE INERCIA

Los volantes de inercia permiten almacenar la energía cinética al hacer girar un volante, almacenando la energía en horas valle y devolviéndolas a la red en horas punta se permite una reducción del consumo del transporte de energía y son capaces de optimizar el uso de subestaciones al existir puntos de consumo menores.

BATERIAS ELECTROQUÍMICA

Las baterías electroquímicas no son más que un conjunto de celdas galvánicas unidas para tener un nivel de tensión específico. El principio de funcionamiento es el de una reacción química de oxidación-reducción donde al realizarse dicha reacción(espontánea) genera electricidad, la contraparte es la inyección de energía eléctrica para realizar una reacción química no espontánea dentro de la celda que permite el almacenamiento de dicha energía para su posterior descarga.

Este tipo de sistema tiene un gran rango tanto de energía acumulable como de potencia de descarga incluso llegando a capacidades de hasta 1MWh para las nuevas baterías electroquímicas de alta capacidad.

BATERÍAS DE FLUJO

Una batería de flujo es una batería recargable constituida por celdas electroquímicas al igual que las baterías electroquímicas, convierte la energía química proveniente de la reacción en electricidad. La diferencia es la posibilidad de almacenar electrolitos en tanques que pueden recargar dichas baterías.

CENTRALES HIDROELÉCTRICAS DE BOMBEO

Realmente la finalidad de las centrales hidroeléctricas de bombeo no es almacenar energía si no generar electricidad obteniendo el mayor beneficio posible al hacerlo, para ello se utiliza un sistema que nos permite llevar desde un embalse inferior hasta un embalse superior el agua durante los periodos de bajo precio eléctrico para su posterior expansión cuando el precio de la electricidad aumente.

CAES

Esta tecnología es la protagonista de este TFG, en los siguientes puntos se entrará más en detalle acerca de esta tecnología. Esta tecnología se basa en el mismo principio que las centrales hidroeléctricas de bombeo, se requiere de un reservorio de aire presurizado el cual se llenará de aire mediante compresores en las horas de menos demanda eléctrica y ese mismo aire se turbinará cuando el precio de la electricidad suba.

Existen muchas más formas de almacenamiento, como el almacenamiento térmico, todas ellas son igual de importantes y cada una se utiliza en el ámbito que mejor se adapte a ellas tanto como si se requiere una alta respuesta para regulación en la red como los supercondensadores como si so generadoras de electricidad con reservorios a gran escala como la tecnología CAES.

3 TECNOLOGÍA CAES

[19] Los sistemas de almacenamiento de energía de aire comprimido, conocidos como sistemas CAES, se fundamentan en un concepto similar al almacenamiento de energía mediante bombeo hidroeléctrico. En estos sistemas, se utilizan dos reservorios de agua, uno superior y otro inferior. Cuando la demanda de energía es alta, se permite que el agua en el reservorio superior se expanda a través de una turbina, generando electricidad y terminando en el reservorio inferior. En contraste, cuando la demanda de energía es baja y, por ende, el precio de la electricidad es menor, se bombea el agua desde el reservorio inferior hasta el superior para su posterior expansión.

Como se puede observar en la Ilustración 3 existen muchos tipos de sistemas de almacenamiento de energía los cuales se pueden clasificar según la potencia que pueden llegar a tener y de la energía que son capaces de almacenar.

La tecnología CAES es una tecnología capaz de tener grandes potencias instaladas y de almacenar una cantidad igual de importante de energía. Además, esta energía se caracteriza por tener la capacidad de suministrar energía por periodos de más de 10 horas hasta 20 horas consecutivas

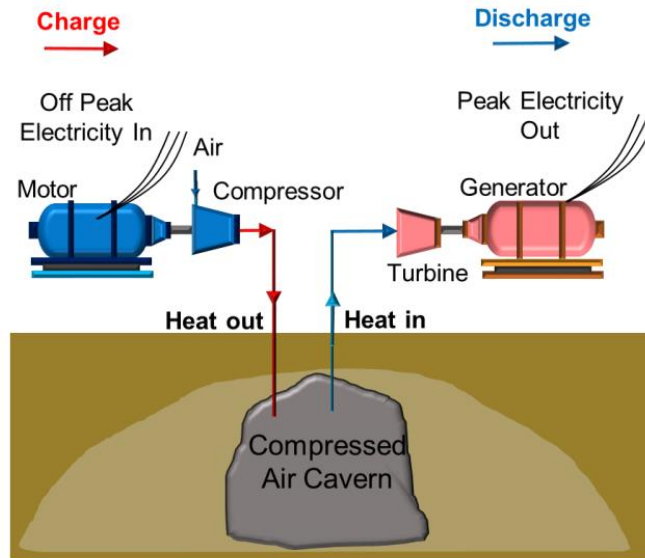


Ilustración 4. Esquema básico CAES. [19].

Los sistemas CAES siguen este principio básico, la Ilustración 4 muestra un esquema básico de estos sistemas, debido al gran volumen de aire requerido y a consideraciones financieras, a menudo se ubican en emplazamientos naturales, como cavernas de sal, acuíferos o minas de caliza, ya que esto suele ser la solución más económicamente viable. Cuando el precio de la energía aumenta, el aire almacenado en estos tanques presurizados se libera y se utiliza para generar electricidad a través de una turbina.

Este proceso se puede dividir en tres etapas principales: compresión, almacenamiento y expansión. Dependiendo de cómo se lleve a cabo cada una de estas etapas, los sistemas CAES se pueden clasificar en tres categorías principales:

- CAES Diabático (DCAES) :

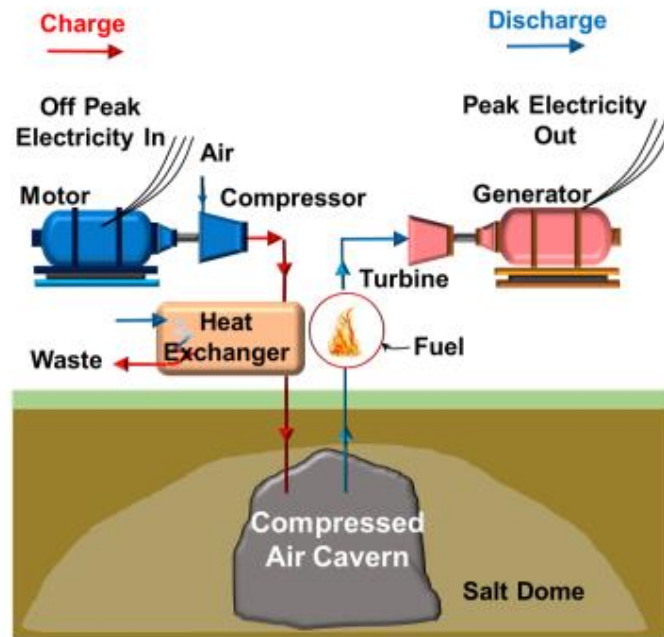


Ilustración 5 Esquema básico del sistema DCAES. [19].

Los sistemas CAES diabáticos se rigen por el ciclo Brayton de gas donde se comprime el aire en primera instancia, luego se pasa al bloque de combustión donde, gracias a un combustible externo como el gas natural (bastante utilizado en estos sistemas) se aumenta la entalpía del fluido que pasará al tren de expansión donde se generará la energía. Lo que caracteriza esta tecnología de las demás que se rigen por este mismo ciclo es la capacidad de almacenar el fluido de trabajo en reservorios preparados para grandes periodos de almacenamiento, para minimizar las pérdidas en este proceso y problemas técnicos debido a la temperatura se enfría el aire comprimido con intercambiadores de calor.

- CAES Adiabático(ACAES):

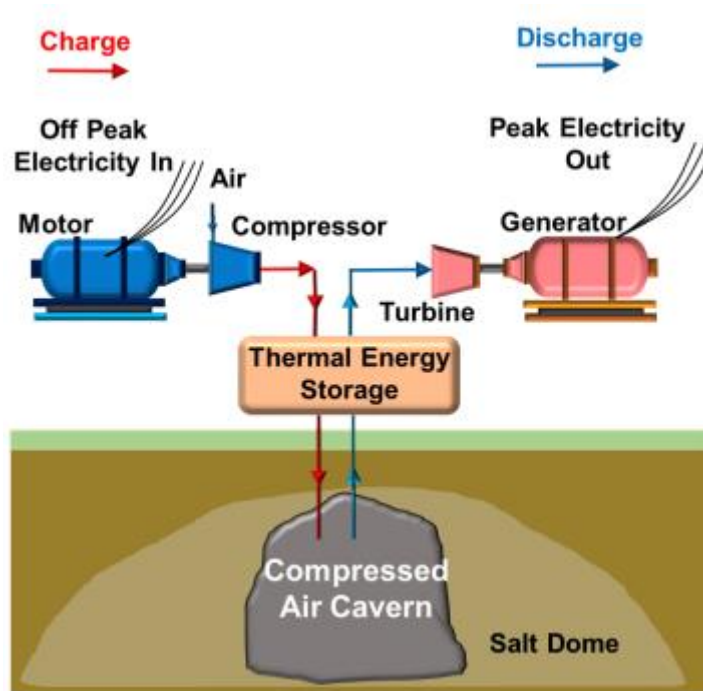


Ilustración 6 Esquema básico del sistema ACAES. [19].

En este enfoque, se añade un subsistema adicional a nuestro sistema general, un almacenamiento de energía térmica, debido a lo anterior dicho sobre los problemas de la temperatura en el almacenamiento, es requerido una disminución de ésta durante el proceso de carga, no obstante los sistemas ACAES almacenan el calor cedido en la carga en un tanque de almacenamiento térmico el cual se utilizará para, cuando lo requiera el sistema, ceder dicho calor al flujo de descarga del reservorio de aire para aumentar su temperatura y así tener una mayor eficiencia global y una mayor potencia específica.

- CAES Isotermo(ICAES):

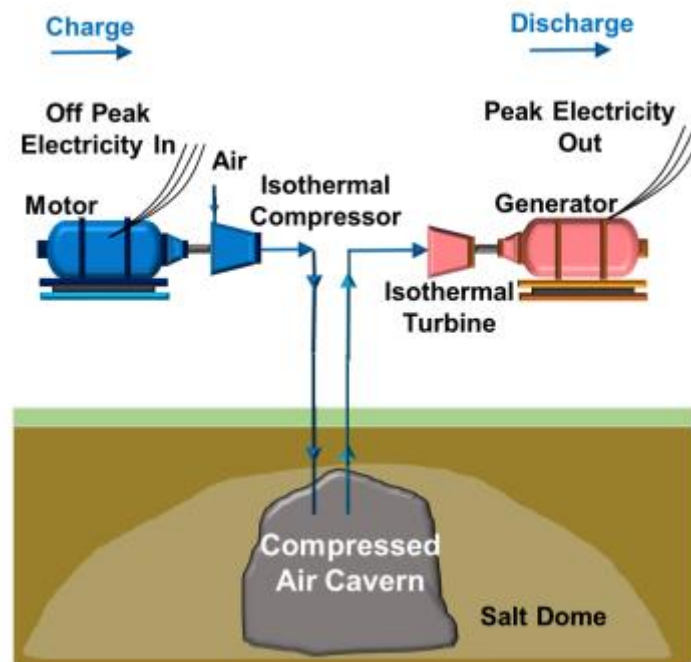


Ilustración 7 Esquema básico del sistema ICAES.[19].

Los sistemas CAES isotermos son los sistemas menos desarrollados entre los tres, mantienen una temperatura constante durante la compresión y la expansión del aire. Esto puede lograrse mediante la extracción escalonada de calor durante la compresión y la adición del calor obtenido de la compresión durante la expansión, lo que también puede mejorar la eficiencia.

Además de estas clasificaciones basadas en el proceso termodinámico, los sistemas CAES también se pueden clasificar según la forma en que se almacena el aire:

- CAES Isobárico: En estos sistemas, la presión del aire comprimido se mantiene constante durante el proceso de almacenamiento.
- CAES Isocórico: En los sistemas CAES isocóricos, el volumen del aire comprimido se mantiene constante durante el almacenamiento, lo que significa que la presión varía.

Aunque esta tecnología está en desarrollo y tiene muchísimo potencial en el mundo solo hay dos plantas comerciales funcionando: La planta Huntorf en Alemania puesta en marcha en 1978 y la planta McIntosh en los Estados Unidos. Esto debido a que, aunque es una tecnología con mucho potencial existen muchos problemas que hacen que sea muy difícil la implementación comercial de esta tecnología.

Una de dichas problemáticas es la inviabilidad de muchos reservorios naturales como cavernas utilizadas para el almacenamiento del aire, un factor importantísimo en estos sistemas, para encontrar cavernas donde tengamos volúmenes que nos permitan tener un periodo de carga y descarga grande para poder abastecer energía durante los periodos importantes del día hay que bajar hasta a 500 metros bajo el suelo. Otro de los problemas que encontramos es que al tratar con un gas, al aumentar la presión hasta niveles

aprovechables la temperatura sube igual llegando a niveles de hasta 600°C dando lugar a problemas metalúrgicos en muchos de los equipos que componen el sistema esta es una de las razones principales de por qué existen alternativas como la ACAES o la ICAES. Por último, la baja eficiencia de equipos como compresores y turbinas hace que la eficiencia y las condiciones de funcionamiento no sean tan altas como se podría esperar ya que si tenemos compresores y turbinas con rendimientos del 80% (no raro en máquinas térmicas como esta) solo podríamos aspirar a rendimientos globales, idealmente, de hasta 64% (80x80) esta es otra de las razones del estudio de modificaciones del ciclo original.

4 COMPONENTES

Antes de hablar de cada tipo de sistema o de su ciclo o de sus mejoras, es necesario una caracterización de los componentes de toda la instalación tanto los elementos encargados del proceso de almacenamiento y producción de la energía hasta los elementos de control y monitorización.

La elección de los elementos y la implementación de todos en un conjunto es fundamental para el correcto funcionamiento de la instalación. Ya sea el tren de compresión, las infraestructuras de CO₂ en CAES de almacenamiento a presión constante o la conexión a red, es imprescindible que todos estos elementos estén correctamente interconectados y en perfecta armonía entre sí.

Compresores.

[2] Durante el periodo de baja demanda eléctrica cuando el precio de la electricidad es bajo, el aire se comprime mediante un conjunto de compresores con compresión escalonada y refrigeración intermedia en cada escalonamiento; esto se hace para disminuir el trabajo realizado por los compresores, almacenar el calor extraído de cada escalonamiento de la compresión y utilizarlo durante la expansión para maximizar el trabajo de las turbinas en la mejor medida.

Como en sistemas como las turbinas de Gas, se utilizan compresores de aire ya sean industriales o a pequeña escala, dependiendo de si estamos hablando de CAES a gran o pequeña escala. En la Ilustración 8 se puede observar el ciclo Brayton con compresión escalonada y refrigeración, el proceso de compresión, aunque es casi adiabático por la propia naturaleza de las máquinas no es reversible y, por ende, no es isentrópico por lo que el proceso tiene un rendimiento interno regido por las distintas pérdidas que se tienen en el transcurso de este proceso como pueden ser las pérdidas por fricción, pérdidas aerodinámicas, etc. El rendimiento de los compresores tiene la siguiente fórmula.

$$\eta = \frac{h_{02} - h_{01}}{h_{02s} - h_{01}}$$

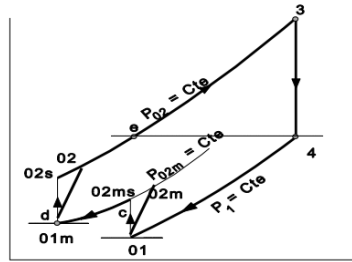


Ilustración 8. Ciclo Brayton refrigeración.

Siendo $h_{02} - h_{01}$ el salto entálpico real dentro del compresor y $h_{02s} - h_{01}$ el salto isentrópico.

Este rendimiento interno varía dependiendo de qué compresores estemos utilizando, los valores típicos son:

Compresores centrífugos

$$\eta \sim 0.7 - 0.8$$

compresores axiales

$$\eta \sim 0.84 - 0.89$$

Turbinas.

[2] El proceso de expansión en sistemas CAES se realiza de manera escalonada, y se utiliza el calor extraído de cada etapa durante la compresión para recalentar las entradas de cada turbina. Esto se hace con el objetivo de maximizar el trabajo de expansión en cada una de ellas. En el ciclo Brayton de la Ilustración 2, el proceso de expansión correspondiente, aunque escalonado y no isentrópico, se encuentra en el paso 3-4.

El rendimiento térmico de la máquina se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\eta = \frac{h_{03} - h_{04s}}{h_{03} - h_{04}} \text{ Donde:}$$

- η representa el rendimiento térmico o interno de la máquina.
- $h_{03} - h_{04s}$ es el trabajo ideal que la máquina realizaría en condiciones isentrópicas.
- $h_{03} - h_{04}$ es el trabajo real realizado por la máquina en el proceso de expansión.

Es importante destacar que el rendimiento térmico es fundamental para estimar y calcular tanto el costo de la compresión como la electricidad producida durante la expansión. Sin embargo, existen otros factores que deben tenerse en cuenta, como las pérdidas mecánicas por rozamiento y las pérdidas eléctricas. Estas pérdidas se reflejan en sus respectivos rendimientos:

Rendimiento Mecánico (η_m): Este rendimiento tiene en cuenta las pérdidas mecánicas que ocurren en el sistema debido al rozamiento y otros factores. Representa la eficiencia de la conversión de energía mecánica en el sistema.

Rendimiento Eléctrico (η_e): El rendimiento eléctrico se refiere a las pérdidas eléctricas que pueden ocurrir en el proceso de conversión de energía mecánica en electricidad. Incluye pérdidas en generadores, transformadores y otros componentes eléctricos.

Estos rendimientos, junto con el rendimiento térmico, son factores clave para evaluar la eficiencia global de un sistema CAES y para determinar la cantidad de electricidad útil que se puede obtener en comparación con la energía de entrada durante el proceso de expansión. La consideración de estos factores es esencial para una planificación precisa y la optimización de sistemas CAES.

Intercambiadores de calor.

Los intercambiadores de calor desempeñan un papel fundamental en el proceso de compresión y expansión en sistemas CAES, ya que regulan la transferencia de calor absorbiendo el calor generado durante la compresión adiabática y transfiriéndolo al proceso de expansión cuando es necesario. Estos componentes contribuyen significativamente a mejorar la eficiencia del ciclo y, en algunos casos, aumentan la potencia neta del sistema.

Existen dos tipos principales de intercambiadores de calor utilizados en estos sistemas, dependiendo del fluido caloportador empleado:

Intercambiadores de Calor Aire-Aire: En este tipo de intercambiador, el aire se utiliza como fluido caloportador. El calor generado durante la compresión se transfiere a través de este intercambiador de calor y se almacena para su posterior uso. Puede utilizarse para precalentar el aire que ingresa al proceso de expansión o para calentar el aire de entrada en cada turbina. Los intercambiadores de flujo cruzado son los más comunes en este tipo de configuración.

Intercambiadores de Calor Aire-Aceite Térmico: En este caso, se utiliza aceite térmico como fluido caloportador en lugar de aire. El funcionamiento es similar al de los intercambiadores Aire-Aire, pero la diferencia radica en el fluido utilizado. Existen varios diseños de intercambiadores de calor adecuados para aceite térmico, entre los que destacan:

- **Intercambiadores de Calor de Tubos y Aletas:** Estos intercambiadores constan de tubos con aletas que permiten una mayor transferencia de calor debido a la mayor superficie de contacto. Son eficientes para la transferencia de calor entre el aceite térmico y el aire.
- **Intercambiadores de Calor de Placas Aleteadas:** En este diseño, las placas están aleteadas para aumentar la eficiencia en la transferencia de calor. Son compactos y se utilizan cuando se requiere un alto rendimiento en un espacio reducido.
- **Intercambiadores de Calor de Serpentin:** Estos intercambiadores utilizan un serpentín de tubos a través del cual fluye el aceite térmico, y el aire se encuentra en contacto con la superficie exterior de los tubos. Son adecuados para aplicaciones específicas.

- **Intercambiadores de Calor de Carcasa y Tubo:** Este tipo de intercambiador consta de un tubo que se coloca dentro de una carcasa. El aceite térmico circula a través del tubo, mientras que el aire se mueve alrededor de la carcasa. Son versátiles y se utilizan en una amplia gama de aplicaciones.

La elección del tipo de intercambiador de calor depende de diversos factores, como las características del sistema CAES, la eficiencia deseada y las condiciones operativas específicas. Cada tipo de intercambiador tiene sus ventajas y limitaciones, y la selección se realiza en función de los requisitos del proyecto.

Almacenamiento de aire.

El almacenamiento de aire comprimido es una fase crítica en los sistemas CAES. Después de la etapa de compresión, el aire se almacena hasta que sea necesario para la generación de energía durante la fase de expansión. El almacenamiento se puede clasificar en dos categorías principales:

- **Almacenamiento a Volumen Constante:** En este enfoque, se requieren grandes cavidades para almacenar el aire comprimido. Es esencial mantener la presión de almacenamiento dentro de un rango de operación específico para garantizar un rendimiento óptimo de la máquina. Alejarse del punto de operación óptimo disminuye significativamente la eficiencia del sistema. Las cavidades subterráneas naturales, como las cavernas de sal o los acuíferos, son ejemplos de lugares utilizados para el almacenamiento a volumen constante.
- **Almacenamiento a Presión Constante:** En este tipo de almacenamiento, se utiliza un sistema que mantiene constante la presión durante todo el proceso de carga y descarga de aire comprimido. Este enfoque mejora el rendimiento y la eficiencia del sistema, ya que mantiene el punto de operación cercano al de diseño de la máquina.

Los sistemas CAES utilizan diferentes tipos de reservorios para el almacenamiento de aire comprimido, y la elección depende de varios factores, que incluyen la ubicación geográfica, los recursos disponibles, la viabilidad económica y la capacidad de almacenamiento requerida. Algunos de los tipos de reservorios utilizados son:

- **Depósitos Subterráneos Naturales:** Estos depósitos aprovechan cavidades naturales, como cavernas de sal o acuíferos, que pueden soportar altas presiones. Proporcionan un espacio seguro y eficiente para el almacenamiento de aire comprimido.
- **Depósitos Subterráneos Artificiales:** En ocasiones, cuando los recursos disponibles en una región son limitados, se recurre a la creación de cavidades subterráneas específicamente excavadas y construidas. Estos depósitos ofrecen una mayor flexibilidad y control en el diseño y la ubicación, pero generalmente requieren una inversión significativa.
- **Depósitos de Superficie:** Estos depósitos se ubican en la superficie, lo que facilita su implementación, pero su eficiencia es menor, ya que almacenan energía térmica adicional.

- **Depósitos Estratégicamente Distribuidos:** Estos son depósitos subterráneos distribuidos en una región geográfica, lo que permite una mayor flexibilidad en el almacenamiento. Se utilizan cuando no hay grandes volúmenes de depósito disponibles en una ubicación específica, y se aprovechan muchas cavidades pequeñas o medianas para lograr el volumen necesario para el sistema.

La elección del tipo de almacenamiento y del reservorio adecuado depende de las necesidades y condiciones específicas del proyecto, así como de los objetivos de eficiencia y viabilidad económica. Cada enfoque tiene sus ventajas y limitaciones, y la selección se realiza en función de los requisitos del sistema CAES y las características del entorno en el que se implementará.

Principio del formulario

Almacenamiento térmico.

Para mejorar el rendimiento de la instalación, se opta por un sistema de almacenamiento térmico con dos reservorios térmicos; uno frío y uno caliente, con el cual se extrae calor del tren de compresión, guardando ese calor mediante un fluido caloportador en el reservorio térmico caliente para su posterior utilización en el tren de expansión pudiendo calentar el aire entrante a las turbinas. Este proceso se ve en la Ilustración 9. Esquema almacenamiento térmico de Thomasson et donde utiliza una serie de intercambiadores de calor para esa transferencia térmica entre el aire utilizado para la generación de energía y el fluido caloportador utilizado para poder almacenar ese calor.

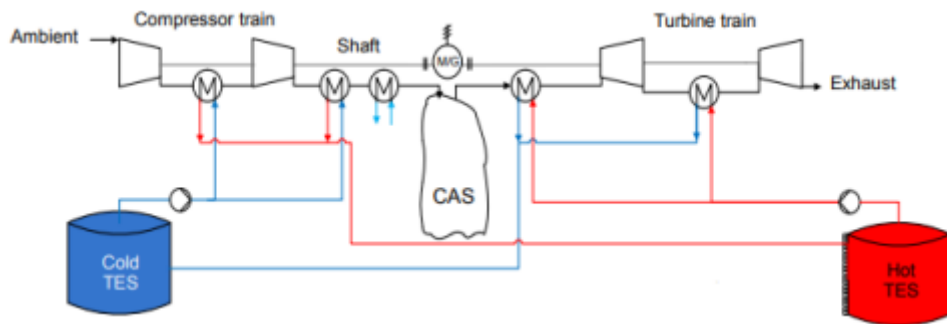


Ilustración 9. Esquema almacenamiento térmico de Thomasson et

En cuanto a los fluidos caloportadores utilizados en sistemas de almacenamiento térmico, la elección del fluido adecuado depende de las necesidades de temperatura, las características de la instalación y las consideraciones económicas. Cada fluido caloportador tiene sus propias características termodinámicas y propiedades físicas que lo hacen más adecuado para ciertos rangos de temperatura y aplicaciones específicas. La elección del fluido caloportador es crucial para optimizar la eficiencia y el rendimiento del sistema.

La Tabla 1 menciona la importancia de seleccionar el fluido caloportador óptimo para un rango de temperaturas específico. Algunos de los parámetros clave que se consideran al elegir un fluido caloportador incluyen la presión de operación, la viscosidad, el

coeficiente de transferencia de calor, la conductividad térmica y otros factores. Cada uno de estos fluidos tiene ventajas y desventajas, por lo que la elección se basa en las necesidades específicas de la instalación y los costos asociados con cada opción.

Los fluidos caloportadores desempeñan un papel esencial en la eficiencia y el rendimiento de los sistemas de almacenamiento de energía térmica. La elección del fluido adecuado es un componente clave para lograr un funcionamiento óptimo y rentable de la instalación.

RANGOS DE TEMPERATURAS DE UTILIZACIÓN	FLUIDOS CALOPORTADORES
>400°C	Gases de combustión, vapor recalentado, aire, sales fundidas, metales fundidos
400°C>T>200°C	Gases de combustión, vapor recalentado, aire, fluidos caloportadores orgánicos (fluidos térmicos)
200°C>T>50°C	Vapor saturado, agua, agua sobrecalentada, aire
50°C>T>0°C	Agua, aire
0°C>T>-30°C	Salmueras, glicoles, freones, NH ₃ , SO ₂ , CO ₂
-30°C>T>-100°C	Metano, propano
<-100°C	Aire líquido, H ₂ , N ₂ (Criogenia)

Tabla 1. Rangos de operación de fluidos caloportadores [9]

La elección de un fluido de transferencia de calor (HTF) en una instalación de almacenamiento y transporte de energía térmica depende de diversas consideraciones, como las características de la instalación y los requisitos termodinámicos. Aquí se presenta una breve comparación entre tres tipos de HTF comunes: el aire, los aceites térmicos y las sales térmicas.

AIRE

Características Termodinámicas: El aire es un recurso abundante y económico, con un amplio rango de temperaturas de operación, que puede variar desde 0°C hasta más de 1000°C, es poco viscoso, limpio estable y seguro, aunque tiene un $C_p=1$ KJ/kg°C y un coeficiente de película bajo.

Condiciones de Instalación: El aire es adecuado para aplicaciones en las que se requieren altas temperaturas. Sin embargo, debido a su naturaleza gaseosa, su coeficiente de transferencia de calor es más bajo, lo que implica la necesidad de equipos de transferencia de calor más grandes y costosos. También tiene una baja densidad y calor específico, lo que requiere un consumo significativo de energía para la compresión y el transporte a través de compresores.

ACEITES TÉRMICOS

Características Termodinámicas: Los aceites térmicos son más seguros en comparación con el aire y pueden operar a altas temperaturas con una presión baja o moderada, su viscosidad depende de la temperatura siendo muy viscosos a bajas temperaturas y poco viscosos a altas temperaturas, tienen un $C_p = 2 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{C}$

Condiciones de Instalación: Los aceites térmicos son líquidos, lo que facilita su transporte mediante bombas, lo que resulta en costos de equipos y redes de transporte menos costosos que los HTF gaseosos como el aire. Sin embargo, algunos aceites térmicos pueden ser inflamables y tóxicos, por lo que deben manejarse con precaución en términos de seguridad.

SALES FUNDIDAS

Características Termodinámicas: Las sales fundidas son adecuadas para aplicaciones de alta temperatura, con temperaturas de operación que pueden superar los 400°C . Tienen una alta capacidad para retener calor.

Condiciones de Instalación: Las sales fundidas tienen una temperatura de solidificación muy alta, alrededor de 200°C , lo que las hace difíciles de manejar a temperaturas moderadas y bajas. Esto requiere sistemas de protección contra el congelamiento, como redes de transporte y equipos con trazadores de calor. Además, deben manejarse con precaución debido a su alta temperatura de operación y a la necesidad de sistemas de seguridad adecuados.

La elección del HTF adecuado depende de las necesidades de temperatura, seguridad y viabilidad económica de la instalación específica. Cada uno de estos HTF tiene sus ventajas y desventajas, y la selección se basa en las características particulares del proyecto y las condiciones de operación.

Cámara de combustión.

[2] Se utiliza en los sistemas CAES convencionales y los sistemas A-CAES, son un factor importante a la hora de la generación de energía ya que aumenta el calor aportado al sistema y por lo tanto el salto entálpico aprovechable por las turbinas.

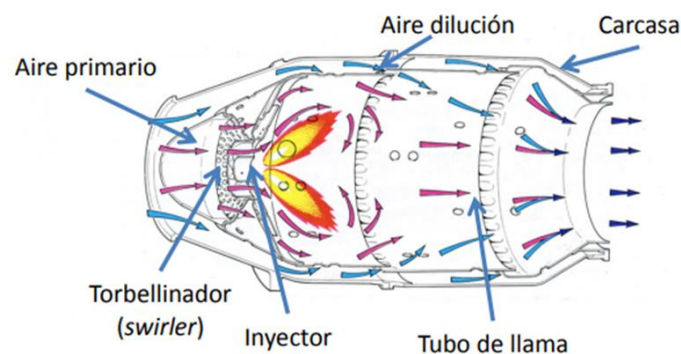


Ilustración 10. Esquema cámara de combustión con referencia en Sistemas de producción de potencia por la Universidad de Sevilla.

La Ilustración 10 muestra un esquema muy simplificado de lo que es una cámara de combustión tubular la más empleada en turbinas de gas industriales, esta cámara de combustión está compuesta por el inyector que es el encargado de regular la entrada de combustible, el tubo de llama donde se encuentra contenida la llama y la carcasa que envuelve todo. Como se puede observar no todo el aire se utiliza para la combustión, alrededor del 20% del aire entrante es utilizado para ello, pero todo lo demás se utiliza para refrigerar la cámara de combustión y para diluir la llama para tener una aerodinámica de llama apropiada para este proceso.

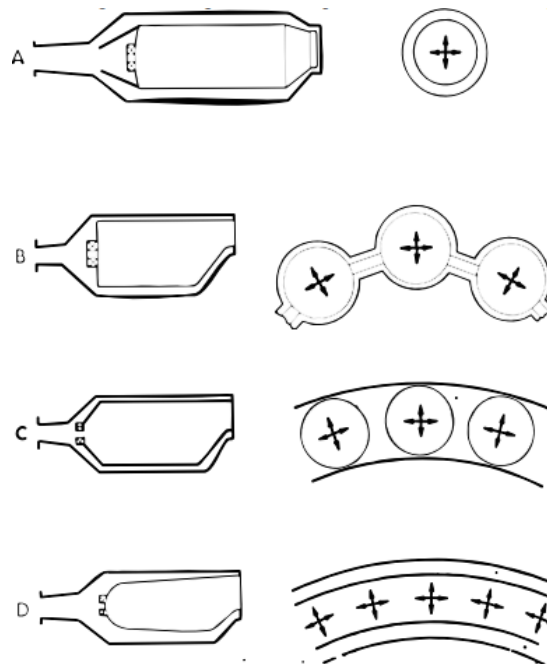


Ilustración 11. Tipología cámara de combustión con referencia en Sistemas de producción de potencia por la Universidad de Sevilla.

Existen distintos tipos de cámaras de combustión en la Ilustración 11 se observan 4 tipos: tipo A tubular, tipo B multitubular, tipo C tuboanular y tipo D anular.

Las 3 últimas son usadas para aplicación aeroderivadas y la primera son las más utilizadas en aplicaciones industriales por lo que es la que más nos importa. Las pérdidas de carga en estos elementos son muy importantes y se tienen muy en cuenta a la hora de hacer los cálculos de la instalación ya que una pérdida de carga localizada implica un aumento significativo en el trabajo de los compresores.

La pérdida de carga que se modela mediante la ecuación $\varepsilon_{cc} = \frac{P_{0e} - P_{0s}}{P_{0e}} \times 100$ siendo:

- P_{0e} la presión de remanso a la entrada de la cámara.
- P_{0s} la presión de remanso a la salida de la cámara.

Tiene unos valores tipo para cada una de las cámaras de combustión:

- TUBULAR: 4%
- MULTITUBULAR: 6-7%
- TUBUANULAR: 4%
- ANULAR: 4%

El rendimiento de estos elementos ronda el 95-98% aunque son equipos muy eficientes aún tienen pérdidas asociadas como son la combustión incompleta debido al tipo de mezcla y el equilibrio químico y a pérdidas caloríficas.

El rendimiento tiene una ecuación que es:

$$\eta = \frac{(\dot{m}_a + \dot{m}_f)h_{0s} - \dot{m}_a h_{0e}}{\dot{m}_f PCI} \times 100$$

- \dot{m}_a : Caudal de aire dispuesto a la combustión.
- \dot{m}_f : Caudal de combustible para reaccionar.
- h_{0e} : Entalpía del flujo a la entrada.
- h_{0s} : Entalpía del flujo a la salida.
- PCI : Poder calorífico inferior del combustible usado.

5 MICRO-CAES.

[4][3] Las plantas a pequeña escala de CAES o micro-CAES se basan en el mismo principio que las plantas CAES a gran escala, pero, a diferencia de éste, estos sistemas a pequeña escala son únicamente estudiados para comprobar su viabilidad. Estos sistemas a diferencia de CAES a gran escala no son capaces de utilizar grandes reservorios naturales para el almacenamiento del aire ya que su uso es puramente doméstico lo que hace que por desgracia las pérdidas térmicas en el almacenamiento de aire sean mucho más significativas que en los sistemas a gran escala en los cuales dichas pérdidas se permiten despreciables. Además, una ventaja de los sistemas CAES a gran escala era el poder utilizar dichos reservorios naturales para ese almacenamiento y poder ahorrarse materiales y dinero en la construcción de tanques de almacenamiento, esto en los sistemas micro-CAES no es posible ya que necesitan ser más versátiles y pequeños.

Por otro lado, este tipo de sistemas favorece la generación distribuida, la generación distribuida es la utilización de energías renovables para la generación eléctrica en las redes de distribución cercanas a las cargas para autoconsumo. Debido a esas pérdidas térmicas en el almacenamiento de aire se optan por diversas estrategias para aumentar el rendimiento de la instalación que suele rondar entre 25-35 % menor que las plantas a gran escala.

Estas estrategias son la cogeneración y la trigeneración. También se optaron por estrategias como utilizar una arquitectura parecida a los CAES adiabáticos para utilizar el calor del tren de compresión en calentar el tren de expansión, pero a diferencia de lo que se puede pensar los sistemas micro-CAES necesitan de un salto entálpico grande por lo que la presión del aire no puede bajar tanto y a su vez el caudal utilizado es bastante pequeño lo que hace que esta estructura no sea viable para su utilización por la mala transferencia de calor del aire.

La cogeneración en estos sistemas es posible al utilizar las pérdidas térmicas en el depósito de aire, así como la utilización de recuperadores de calor al final del tren de expansión para poder conseguir esa energía en agua caliente sanitaria o como sistemas auxiliares para sistemas de calefacción. Así como un intento de calentar las corrientes de expansión para un aumento en el rendimiento del ciclo.

La trigeneración aparte de utilizar ese calor para aumentar el rendimiento del ciclo o utilizarlo para fines domésticos. Se pueden utilizar las corrientes refrigeradas como método de obtención de frío, aunque no se pueden sustituir los sistemas de refrigeración si puede suponer una ayuda para estos y así ser posible la reducción de su consumo.

6 TERMODINÁMICA DEL CICLO

[8] CAES (Almacenamiento de Energía de Aire Comprimido), al igual que las centrales hidroeléctricas de bombeo, representa una de las pocas formas de almacenamiento de energía capaces de generar una potencia significativa, pudiendo producir entre 50 y 300 MW con una sola unidad. Estos sistemas, al utilizar esencialmente aire como gas, se basan en el ciclo Brayton, que se ilustra en la Ilustración 12. Este ciclo Brayton presenta una compresión y una expansión escalonada.

El ciclo Brayton es un ciclo termodinámico que se utiliza en sistemas de turbina de gas y motores de reacción, y es fundamental en el funcionamiento de los sistemas de almacenamiento de energía de aire comprimido. En el contexto de CAES, el ciclo Brayton se adapta para comprimir aire utilizando energía eléctrica en periodos de baja demanda y almacenarla en cavernas subterráneas o tanques a presión. Luego, durante los periodos de alta demanda energética, el aire comprimido se expande para impulsar una turbina y generar electricidad.

La Ilustración 12 muestra este ciclo Brayton con compresión y expansión escalonada, lo que implica que el proceso de compresión y el proceso de expansión no son continuos, sino que se realizan en etapas o escalones. Esto permite un mayor control sobre el flujo de aire y la eficiencia del sistema, especialmente en términos de recuperación de calor y minimización de pérdidas energéticas durante la compresión y la expansión.

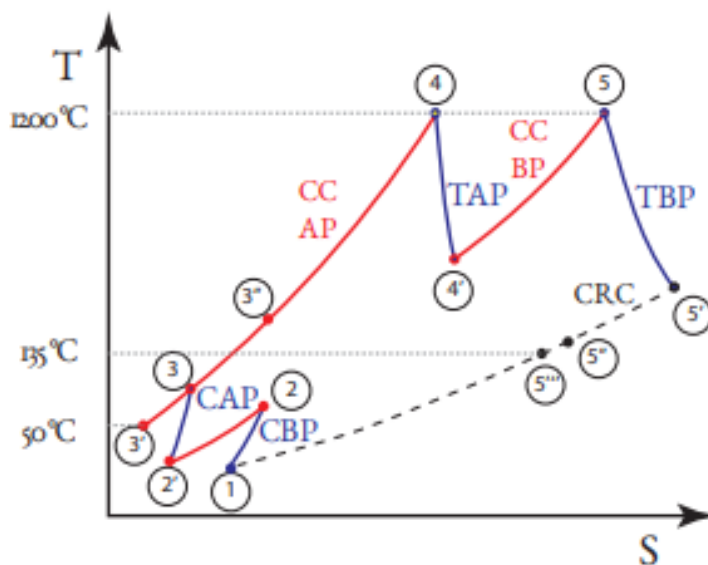


Ilustración 12. Representación ciclo Brayton

Aunque así es de forma general el ciclo, al ser una generadora de electricidad y con infraestructuras grandes, a veces se requieren de modificaciones para poder aumentar esa potencia o aumentar el rendimiento en el ciclo.

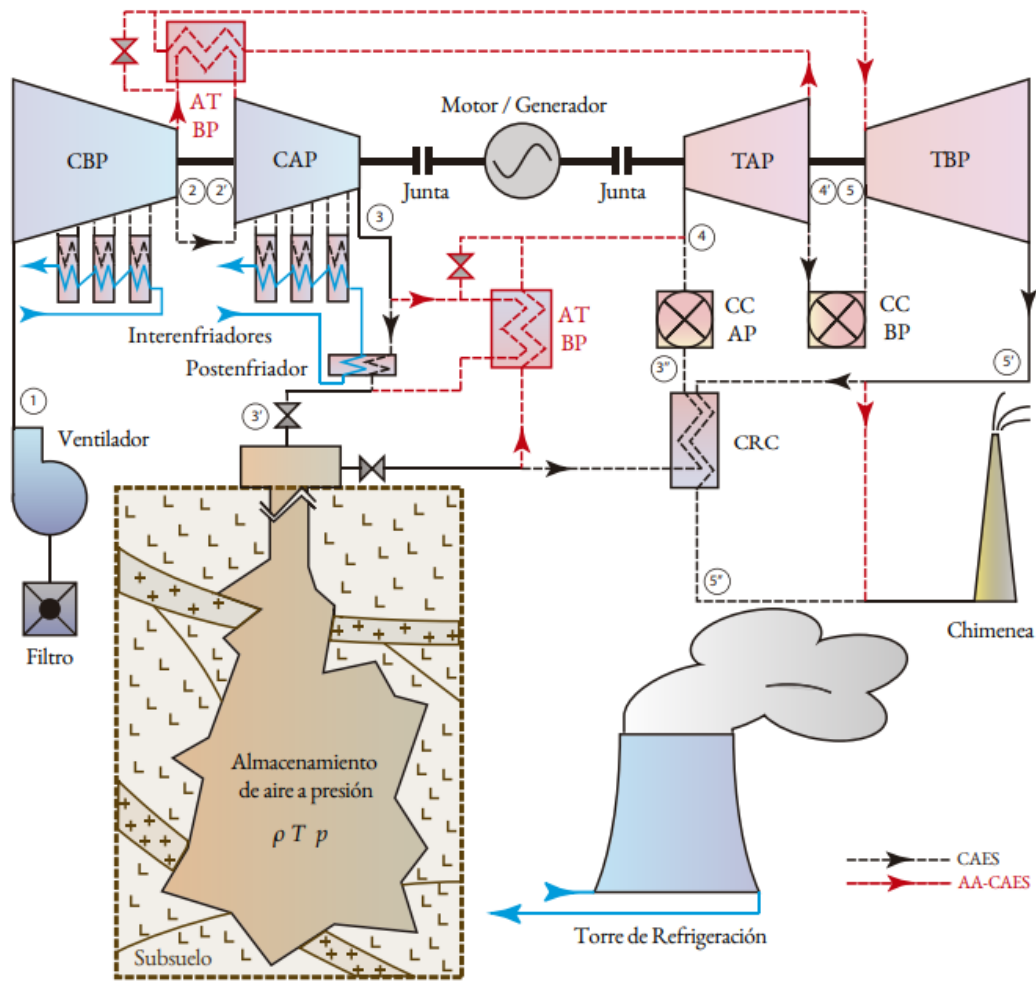


Ilustración 13. Representación tecnologías CAES

La Ilustración 13 muestra un esquema básico de cómo se compone los tres tipos de tecnologías utilizadas en CAES, los sistemas CAES, AA-CAES y A-CAES siendo este último una combinación de los últimos dos.

Tecnología CAES

La más comercializada de todas las tecnologías CAES, también llamada CAES diabático y la única que está implementada en plantas de potencia con almacenamiento de aire comprimido. Empezando desde el punto 1 nos encontramos con un ventilador con un filtro utilizado para captar el aire atmosférico lo más limpio posible (es el comienzo del tren de compresión), luego pasamos a los procesos 1-2 y 2'-3 que son los compresores de baja presión (CBP) y de alta presión (CAP) la compresión escalonada como se explicó anteriormente, durante este proceso se pueden observar varias extracciones utilizadas para refrigerar el aire a su paso por los compresores lo que ayuda a que el trabajo de compresión disminuya, esto se utiliza mediante una serie de intercambiadores de calor que utilizan como fluido caloportador agua procedente de una torre de refrigeración a una temperatura menor. Una vez terminamos con el proceso de compresión pasamos al almacenamiento del aire comprimido, esto comienza en el punto 3' que, mediante válvulas reguladoras de caudal permiten el paso del aire al reservorio de aire en el cual se

intenta mantener la temperatura del aire lo más constante posible durante la carga y descarga de éste, una vez se requiera la expansión del fluido se abre la válvula de descarga del reservorio dejando pasar dicho fluido hasta el siguiente proceso, la combustión, para aprovechar la máxima energía posible durante el proceso se utiliza un intercambiador de calor (CRC) que permite que el aire que va hacia la cámara de combustión absorban energía de los gases de escape del final del proceso de expansión, luego pasamos a la combustión, en el proceso 3'-4, este proceso sirve para aumentar aún más el salto entálpico producido en las turbinas posteriormente utilizando como combustible gas natural mayormente, una vez terminada la combustión se utilizan los gases de postcombustión como fluido a expandir durante los procesos 4-4' y 5-5' se tienen 2 turbinas, una de alta presión (TAP) y otra a baja presión (TBP) con otra cámara de combustión en el proceso 4'-5, es decir, en medio de las dos turbinas, esto para aprovechar el oxígeno sobrante de la primera combustión para realizar otra y aumentar aún más el salto entálpico durante la expansión una vez se termina la expansión, como antes se ha comentado los gases de escape se enfría mediante un intercambiador de calor utilizado para calentar el aire de entrada a la primera cámara de combustión ya que dichos gases de escape irán a una chimenea produciendo una gran cantidad de pérdidas energéticas en el sistema, por eso se enfría para disminuir lo máximo posible dichas pérdidas, no obstante, al desaprovechar tanta energía térmica esta tecnología alcanza solo unos rendimientos de entre 25-40%.

Un referente para esta tecnología es la Kraftwerk, Huntorf (Alemania) es una de las dos plantas de almacenamiento de energía por aire comprimido que están operando, con una potencia de 321 MW y con una presión máxima garantizada de 100 bar.

Tecnología AA-CAES

Aun en estudio la tecnología AA-CAES o CAES adiabático presenta grandes oportunidades para el desarrollo de estas plantas de almacenamiento de energía. Representado en la Ilustración 13 con líneas y elementos rojos, esta tecnología utiliza el calor residual del tren de compresión en calentar los escalonamientos del tren de expansión. En este nuevo ciclo se incluye un elemento, el almacenamiento térmico permitiendo el uso del calor cuando fuese necesario y reduciendo drásticamente el consumo de combustible en la central hasta niveles en los que no hiciese falta ese combustible. Este ciclo puede llegar a rendimientos de hasta 70% en el mejor de los casos.

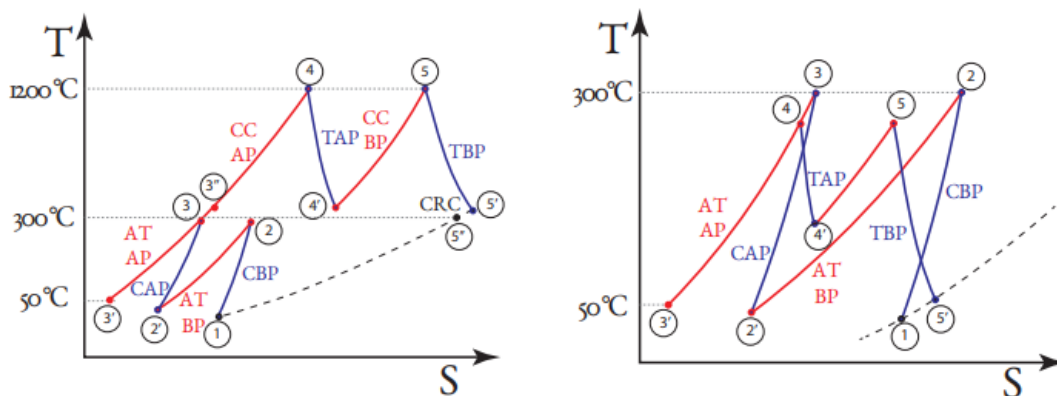


Ilustración 14. Representación ciclo CAES y AA-CAES

La Ilustración 14 presenta dos ciclos, ciclo CAES en la izquierda y ciclo AA-CAES en la derecha, como se puede observar, el ciclo de los sistemas CAES es un ciclo Brayton con escalonamientos y regenerativo teniendo el tren de compresión con enfriamiento entre escalonamientos entre los puntos 1-3, el proceso de 4-5' muestra el tren de expansión con un recalentamiento intermedio de 4'-5 y un proceso de combustión de 3'-4. A parte, para disminuir el calor aportado al ciclo por la cámara de combustión se instala un regenerador a la salida de la turbina de baja presión utilizando el calor residual para calentar el flujo de gas entrante a la cámara de combustión como se ve en los puntos 5'-3'', esto permite que el rendimiento del ciclo suba y además, una disminución en el coste de combustible necesario. Por otro lado tenemos la tecnología AA-CAES en el ciclo de la derecha que utiliza ese calor de los compresores mostrados en la curva como los procesos CAP y CBP para almacenarlos en los tanques de almacenamiento térmico (AT-AP y AT-BP) para utilizarlos en las turbinas(TAP y TBP).

Tecnología A-CAES

Esta tecnología, aún en proceso de investigación y desarrollo, presenta una oportunidad muy prometedora para los sistemas de producción de energía al combinar características de las dos tecnologías anteriores mencionadas: CAES y AA-CAES. En lugar de limitarse a uno u otro enfoque, este sistema innovador aprovecha lo mejor de ambos mundos para maximizar la eficiencia y la capacidad de generación de energía.

En primer lugar, la inclusión de tanques de almacenamiento térmico permite al sistema capturar y almacenar el calor residual generado durante el proceso de compresión y expansión del aire. Este calor puede ser utilizado posteriormente para elevar la temperatura del aire comprimido antes de su expansión en las turbinas, aumentando así la eficiencia global del sistema al aprovechar la energía térmica que de otro modo se desperdiciaría.

Además, la integración de cámaras de combustión añade una dimensión adicional al sistema al permitir la adición controlada de calor al proceso. Estas cámaras de combustión pueden utilizar una variedad de combustibles, incluyendo gas natural, biogás o incluso energía solar concentrada, para generar calor adicional que se puede utilizar para aumentar aún más la temperatura del aire comprimido. Esta capacidad de ajustar y controlar la temperatura del aire permite al sistema adaptarse a diferentes condiciones de operación y demandas de energía, mejorando así su flexibilidad y utilidad en una amplia gama de aplicaciones.

En términos de rendimiento, este enfoque híbrido suele ofrecer una eficiencia energética que se sitúa entre el 30% y el 60%, dependiendo de varios factores como la temperatura de operación, el diseño del sistema y la disponibilidad de recursos energéticos. Esta gama de eficiencia refleja la naturaleza adaptable y versátil de esta tecnología, que puede ser ajustada y optimizada para satisfacer las necesidades específicas de cada aplicación y entorno operativo.

Es notablemente interesante que, aunque el objetivo del AA-CAES es minimizar cualquier intercambio de calor durante el proceso, el enfoque diatérmico, a pesar de emplear cámaras de combustión, también busca reducir al mínimo el flujo de calor al

aprovechar cada calor residual disponible de manera eficiente. Esta convergencia de objetivos, aunque inicialmente irónica, demuestra la importancia fundamental de maximizar la eficiencia energética y minimizar las pérdidas en cualquier sistema de generación de energía.

En resumen, esta tecnología innovadora se sitúa en un punto intermedio entre las tecnologías de almacenamiento de energía de aire comprimido adiabático y diatérmico, aprovechando las ventajas de ambos enfoques para lograr una mayor eficiencia y rendimiento en la generación de energía. Su capacidad para utilizar cada calor residual disponible para mejorar la eficiencia energética representa un paso significativo hacia la optimización de los sistemas de almacenamiento de energía y la integración de fuentes de energía renovable en la red eléctrica.

7 APLICACIONES REALES

7.1 HYDROSTOR TORONTO.

[18] Hydrostor Inc. es una empresa principalmente del sector de energía eléctrica que se dedica a los sistemas de almacenamiento de larga duración utilizando aire comprimido y agua.

El proyecto Hydrostor Toronto es el primer proyecto de almacenamiento mediante aire comprimido submarino ubicado en el lago Ontario ubicado en Toronto, Canadá. Este proyecto se basa principalmente en la tecnología A-CAES ya explicado anteriormente.

Esta central de almacenamiento utiliza el aire comprimido y la presión del agua para conseguir un reservorio de aire manteniendo la presión constante en todo momento utilizando el entorno para esta operación. El funcionamiento, principalmente se basa en unos globos formados por unas membranas impermeables que se expanden conforme se va introduciendo el aire comprimido dentro de ellas durante el proceso de compresión para posteriormente ayudándose del propio peso del agua, descargar el aire comprimido de dichas membranas y comenzando el proceso de expansión.

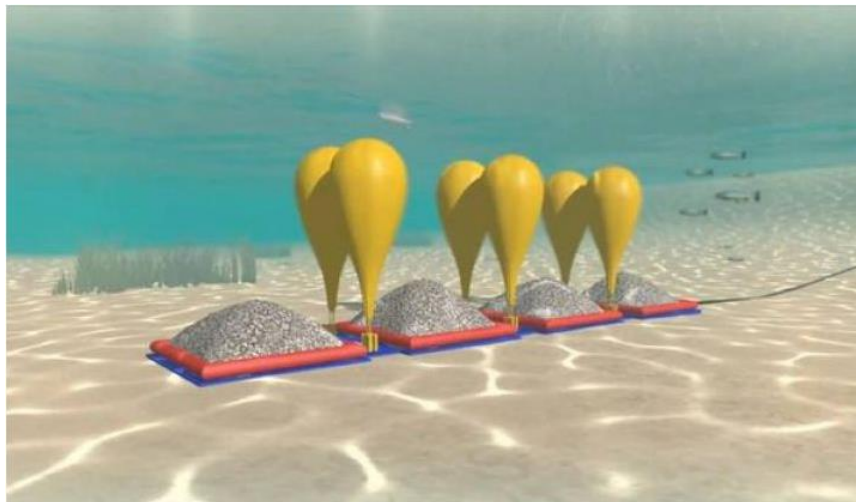


Ilustración 15 Reservorio de aire en forma de globos. Con referencia en <https://ecoinventos.com/hydrostor/>

Como muestra la Ilustración 15 esa es la forma de los reservorios especiales para el almacenamiento del aire comprimido.

Este proyecto cuenta con un contrato de compra-venta de electricidad de 25 años, siendo contratados 200MW de potencia instalada que aseguran que son capaces de suministrar energía eficientemente durante 8 horas seguidas y manteniendo unos niveles de emisiones de carbono nulas lo que lo hace bastante atractivo estos días.

Este proyecto es uno de los pioneros de la tecnología A-CAES con reservorio de aire a presión constante. Gracias al aprovechamiento del propio lago consiguen un rendimiento mayor que en otras tecnologías CAES que utilizan reservorios de aire a volumen constante.

7.2 KRAFTWERK, HUNTORF

[17] La central de almacenamiento de energía mediante aire comprimido Huntorf, construida en 1978 en Alemania cuenta con una potencia instalada de 290 MW capaz de suministrar energía durante 3 horas seguidas.

Esta central fue una de las pioneras en este sector siendo hasta la fecha la más grande construida, sus principales características operacionales vienen reflejadas en la Tabla 1.

output	
turbine operation	290 MW (< 3 hrs)
compressor operation	60 MW (< 12 hrs)
air flow rates	
turbine operation	417 kg/s
compressor operation air mass flow	108 kg/s
ratio in/out	1/4
number of air caverns	2
air cavern volumes (single)	≈ 140 000 m ³
	≈ 170 000 m ³
total cavern volume	≈ 310 000 m ³
cavern location	
- top	≈ 650 m
- bottom	≈ 800 m
maximum diameter	≈ 60 m
well spacing	220 m
cavern pressures	
minimum permissible	1 bar
minimum operational (exceptional)	20 bar
minimum operational (regular)	43 bar
maximum permissible & operational	70 bar
maximum pressure reduction rate	15 bar/h

Tabla 1 Condiciones operacionales de la planta con referencia en More than 20 years of successful operation por Fritz Crotagino.

Esta central de almacenamiento cuenta con dos cavernas subterráneas que juntas conforman un volumen total de 310000 m³, Un tren de compresión de 60MW que trabaja durante casi 12 horas y un tren de expansión de 290 MW que es capaz de funcionar durante casi 3 horas. Durante la expansión es necesario Gas Natural a parte del aire comprimido ya que esta central con tecnología CAES pura ya que fue una de las primeras en construirse.

El tren de expansión constituido por una turbina de gas, no es una turbina de gas normal porque no está formada por compresor, cámara de combustión y máquina térmica turbina ya que el aire ya llega comprimido desde su reservorio por lo que el tren de expansión se conforma únicamente por cámara de combustión donde llega el aire ya comprimido y el gas natural obteniéndose gases de combustión con mayor entalpía que si solo utilizásemos el aire comprimido antes almacenado, gracias a esto conseguimos un mayor salto entálpico durante el proceso de expansión en la máquina térmica turbina.

Esta central, aunque con una capacidad de suministrar poca energía en comparación con otras tecnologías de almacenamiento, permite tener una muy rápida respuesta a la hora de necesidad de energía siendo capaz de poner en marcha la central en unos pocos minutos lo que permite una mayor estabilidad en la red.

8 . ANÁLISIS TERMODINÁMICO DEL PROCESO DE ALMACENAMIENTO CON AIRE SECO

es el propio almacenamiento del aire comprimido. Como se mencionó anteriormente, existen dos enfoques principales para almacenar este aire: manteniendo constante el volumen o la presión. Este capítulo se centra en realizar un análisis comparativo de estas dos formas de realizar el proceso desde una perspectiva puramente termodinámica. Se abordará el trabajo límite aprovechable de cada proceso y la cantidad de energía que cada método es capaz de contener.

Para llevar a cabo este análisis, se empleó el software Mini-Refprop, el cual se utilizó para simular 33 puntos específicos del aire seco, variando la presión mientras se mantenía constante la temperatura. Esto se realizó en cuatro casos distintos: uno en el que el aire se almacena a 25°C constantes, otro a 100°C, otro a 200°C y el último a 400°C. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada punto específico, que incluyen la energía interna, densidad, entalpía y exergía del flujo:

[En esta sección se proporcionarían los resultados obtenidos de la simulación para cada punto específico, detallando los valores de energía interna, densidad, entalpía y exergía del flujo para cada uno de los casos analizados.]

Este análisis detallado nos permitirá comprender mejor las diferencias entre los dos enfoques de almacenamiento de aire comprimido.

PRESIÓN (bar)	DENSIDAD (kg/m³)	Um (kJ/kg)	ENTALPÍA (kJ/kg)	EXERGÍA FLUJO (kJ/kg)
200	226.78	3329.3	3417.5	846.16
195	221.75	3330.1	3418	843.93
190	216.67	3330.9	3418.6	841.65
185	211.54	3331.7	3419.2	839.31
180	206.36	3332.6	3419.8	836.92
175	201.13	3333.4	3420.4	834.46
170	195.86	3334.3	3421.1	831.95
165	190.54	3335.2	3421.8	829.36
160	185.18	3336	3422.4	826.7
155	179.77	3336.9	3423.1	823.96
150	174.32	3337.8	3423.9	821.13
145	168.83	3338.7	3424.6	818.22
140	163.29	3339.6	3425.3	815.21
135	157.72	3340.5	3426.1	812.09
130	152.12	3341.5	3426.9	808.86

125	146.48	3342.4	3427.7	805.51
120	140.80	3343.3	3428.5	802.03
115	135.10	3344.3	3429.4	798.41
110	129.36	3345.2	3430.2	794.63
105	123.60	3346.2	3431.1	790.67
100	117.81	3347.1	3432	786.53
95	112.00	3348.1	3432.9	782.18
90	106.17	3349.1	3433.8	777.59
85	100.32	3350	3434.8	772.75
80	94.45	3351	3435.7	767.61
75	88.57	3352	3436.7	762.15
70	82.67	3353	3437.7	756.3
65	76.77	3354	3438.6	750.03
60	70.86	3355	3439.7	743.25
55	64.94	3356	3440.7	735.88
50	59.01	3357	3441.7	727.81
45	53.09	3358	3442.7	718.88
40	47.16	3359	3443.8	708.89

Tabla 2 Propiedades termodinámicas a 25°C

La Tabla 2 muestra el resumen de las propiedades termodinámicas calculadas mediante Mini-Refprop para una temperatura de 25 °C

PRESIÓN (bar)	DENSIDAD (kg/m³)	Um (kJ/kg)	ENTALPÍA (kJ/kg)	EXERGÍA FLUJO (kJ/kg)
200	174.43	3393.9	3508.6	855.85
195	170.51	3394.5	3508.9	853.6
190	166.57	3395.1	3509.2	851.29
185	162.59	3395.7	3509.5	848.93
180	158.59	3396.3	3509.8	846.51
175	154.57	3397	3510.2	844.02
170	150.51	3397.6	3510.5	841.48
165	146.43	3398.2	3510.9	838.86
160	142.33	3398.8	3511.3	836.16
155	138.20	3399.5	3511.6	833.39
150	134.04	3400.1	3512	830.53
145	129.86	3400.8	3512.4	827.59
140	125.65	3401.4	3512.8	824.54
135	121.42	3402.1	3513.2	821.39
130	117.16	3402.7	3513.7	818.13
125	112.89	3403.4	3514.1	814.74
120	108.58	3404	3514.6	811.22
115	104.26	3404.7	3515	807.56
110	99.92	3405.4	3515.5	803.74
105	95.55	3406.1	3516	799.75
100	91.16	3406.7	3516.4	795.57
95	86.75	3407.4	3516.9	791.17

90	82.33	3408.1	3517.4	786.55
85	77.88	3408.8	3517.9	781.66
80	73.42	3409.5	3518.5	776.49
75	68.93	3410.2	3519	770.98
70	64.43	3410.9	3519.5	765.09
65	59.91	3411.6	3520.1	758.78
60	55.38	3412.3	3520.7	751.95
55	50.83	3413	3521.2	744.54
50	46.27	3413.7	3521.8	736.42
45	41.69	3414.5	3522.4	727.45
40	37.10	3415.2	3523	717.42

Tabla 3 Propiedades termodinámicas a 100°C

La Tabla 3 muestra el resumen de las propiedades termodinámicas calculadas mediante Mini-Refprop para una temperatura de 100 °C

PRESIÓN (bar)	DENSIDAD (kg/m3)	Um (kJ/kg)	ENTALPÍA (kJ/kg)	EXERGÍA FLUJO (kJ/kg)
200	135.68	3474.6	3622	888.93
195	132.60	3475.1	3622.1	886.61
190	129.51	3475.5	3622.2	884.24
185	126.40	3475.9	3622.3	881.81
180	123.28	3476.4	3622.4	879.32
175	120.13	3476.8	3622.5	876.77
170	116.97	3477.3	3622.6	874.15
165	113.80	3477.7	3622.7	871.46
160	110.60	3478.2	3622.8	868.7
155	107.39	3478.6	3623	865.86
150	104.16	3479.1	3623.1	862.92
145	100.92	3479.6	3623.2	859.9
140	97.66	3480	3623.4	856.78
135	94.38	3480.5	3623.5	853.55
130	91.08	3481	3623.7	850.21
125	87.77	3481.4	3623.8	846.75
120	84.44	3481.9	3624	843.15
115	81.10	3482.4	3624.2	839.41
110	77.74	3482.9	3624.4	835.5
105	74.36	3483.3	3624.5	831.43
100	70.97	3483.8	3624.7	827.16
95	67.56	3484.3	3624.9	822.68
90	64.14	3484.8	3625.1	817.97
85	60.70	3485.3	3625.3	813
80	57.24	3485.8	3625.5	807.73
75	53.77	3486.3	3625.8	802.14
70	50.29	3486.8	3626	796.16
65	46.79	3487.3	3626.2	789.75

60	43.27	3487.8	3626.4	782.84
55	39.74	3488.3	3626.7	775.33
50	36.20	3488.8	3626.9	767.12
45	32.64	3489.3	3627.2	758.06
40	29.06	3489.8	3627.5	747.93

Tabla 4 Propiedades termodinámicas a 200°C

La Tabla 4 muestra el resumen de las propiedades termodinámicas calculadas mediante Mini-Refprop para una temperatura de 200 °C

PRESIÓN (bar)	DENSIDAD (kg/m³)	Um (kJ/kg)	ENTALPÍA (kJ/kg)	EXERGÍA FLUJO (kJ/kg)
200	95.68	3634	3843.1	993.78
195	93.47	3634.3	3842.9	991.35
190	91.26	3634.6	3842.8	988.87
185	89.04	3634.8	3842.6	986.32
180	86.81	3635.1	3842.5	983.72
175	84.57	3635.4	3842.3	981.05
170	82.32	3635.6	3842.2	978.32
165	80.06	3635.9	3842	975.51
160	77.79	3636.2	3841.9	972.62
155	75.51	3636.5	3841.7	969.66
150	73.23	3636.7	3841.6	966.6
145	70.93	3637	3841.5	963.46
140	68.62	3637.3	3841.3	960.21
135	66.30	3637.6	3841.2	956.85
130	63.97	3637.9	3841.1	953.38
125	61.64	3638.2	3841	949.79
120	59.29	3638.4	3840.8	946.06
115	56.93	3638.7	3840.7	942.18
110	54.57	3639	3840.6	938.14
105	52.19	3639.3	3840.5	933.93
100	49.80	3639.6	3840.4	929.53
95	47.41	3639.9	3840.3	924.91
90	45.00	3640.2	3840.2	920.06
85	42.58	3640.5	3840.1	914.94
80	40.16	3640.8	3840	909.54
75	37.72	3641.1	3839.9	903.79
70	35.28	3641.4	3839.8	897.67
65	32.82	3641.7	3839.7	891.12
60	30.36	3642	3839.6	884.06
55	27.88	3642.3	3839.5	876.4
50	25.39	3642.6	3839.5	868.04
45	22.90	3642.9	3839.4	858.82
40	20.39	3643.2	3839.3	848.54

Tabla 5 Propiedades termodinámicas a 400°C

La Tabla 5 muestra el resumen de las propiedades termodinámicas calculadas mediante Mini-Refprop para una temperatura de 400 °C

Una vez recopiladas todas las propiedades termodinámicas necesarias para el análisis se procederá a calcular los parámetros que se usarán para comparar los procesos a presión y volumen constante.

8.1 Trabajo límite termodinámico.

Se comenzará con la obtención del trabajo límite en cada proceso. Para el análisis se tomará un sistema adiabático y reversible por el cual se simulará el proceso de expansión como volumen de control aprovechando la energía restante en la descarga del aire de la siguiente forma:

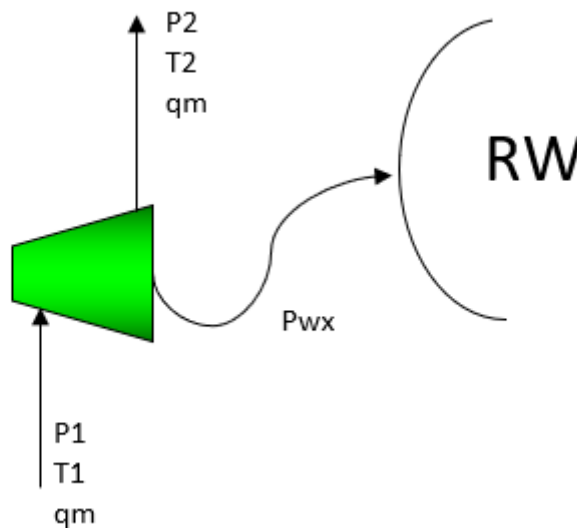


Ilustración 16. Proceso de expansión.

La Ilustración 16 muestra el volumen de control escogido, un sistema abierto estacionario donde no hay fugas en el caudal de fluido ni fugas térmicas debido a que se ha tomado el proceso adiabático reversible. Donde:

- P_1 y T_1 son la presión y temperatura en el estado inicial, es decir, a la salida del reservorio de aire y entrada a la turbina.
- P_2 y T_2 son la presión y temperatura en el estado final, es decir, a la salida de la turbina.

Las condiciones a la salida de la máquina térmica turbina será siempre las ambientales (25°C y 1 bar) y las condiciones a la entrada dependerá de las condiciones a la que se encuentre el aire durante su descarga.

El proceso a estudio va a ser un proceso genérico, siendo las propiedades termodinámicas representadas por unidad de volumen ya que así se ve completamente representada la capacidad que tiene el proceso de producir trabajo.

La potencia mecánica límite, o reversible, se calcula mediante un balance de exergía para un sistema abierto estacionario y reversible genérico:

$$d(m^{VC} \cdot e_{x,c}^{VC}) = \sum_{VRQ \neq E} d'Q^{VC \leftrightarrow RQ} \cdot \left(1 - \frac{T^E}{T^{RQ}}\right) + \sum_{VRQ \neq E} d'W^{VC \leftrightarrow RW} + \sum_{V \neq E} dn^e \cdot e_{x,a}^{VC} - \sum_{V \neq E} dn^s \cdot e_{x,a}^{VC} - T^E \cdot dS^U$$

Siendo:

- $d(m^{VC} \cdot e_{x,c}^{VC})$. La variación de exergía de un sistema cerrado en nuestro volumen de control.
- $\sum_{VRQ \neq E} d'Q^{VC \leftrightarrow RQ} \cdot \left(1 - \frac{T^E}{T^{RQ}}\right)$. El sumatorio de toda la exergía debido a los reservorios de calor de nuestro volumen de control.
- $\sum_{VRQ \neq E} d'W^{VC \leftrightarrow RW}$. El sumatoria de toda la exergía debido a los reservorios de trabajo de nuestro volumen de control.
- $\sum_{V \neq E} dn^e \cdot e_{x,a}^{VC} - \sum_{V \neq E} dn^s \cdot e_{x,a}^{VC}$. La variación entre la entrada y la salida de la exergía de un flujo en nuestro volumen de control.
- $-T^E \cdot dS^U$. La exergía destruida de nuestro sistema.

Una vez tenemos el balance de exergía genérico lo adaptamos a las condiciones de nuestro sistema:

- Nuestro sistema es abierto estacionario por lo que el término de variación de exergía en un sistema cerrado es nulo.
- Es un proceso adiabático por lo que el término de exergía debido a reservorios de calor es nulo.
- Debido a que es un proceso reversible la exergía destruida es nula.
- Suponemos un flujo de salida en condiciones ambientales, por lo que el término de exergía a la salida es nulo.
- No tenemos cantidades fijas de materia y todos los resultados se requieren por unidad de volumen.

Con todo esto se nos queda la siguiente ecuación:

$$0 = W_X^{S \leftrightarrow RW} + \rho \cdot (ex_a^e)$$

Siendo:

- $W_X^{S \leftrightarrow RW}$. El trabajo límite intercambiado con todo reservorio de trabajo que no sea el ambiente por unidad de volumen de nuestro sistema.
- $\rho \cdot (ex_a^e)$. El producto entre la densidad del fluido a la entrada y la exergía del fluido a la entrada de nuestro sistema.

PRESIÓN (bar)	Wx (kJ/m3) 25°C	Wx (kJ/m3) 100°C	Wx (kJ/m3) 200°C	Wx (kJ/m3) 400°C
200	191892.16	149285.92	120610.02	95080.90
195	187141.48	145547.34	117564.49	92665.45
190	182360.31	141799.38	114517.92	90246.25
185	177547.64	138027.53	111460.78	87822.92
180	172706.81	134248.02	108402.57	85396.73
175	167834.94	130460.17	105326.38	82967.40
170	162945.73	126651.15	102249.33	80535.30
165	158026.25	122834.27	99172.15	78100.31
160	153088.31	119010.65	96078.22	75662.06
155	148123.29	115174.50	92984.71	73221.94
150	143139.38	111324.24	89881.75	70779.29
145	138140.08	107470.84	86781.11	68334.36
140	133115.64	103603.45	83669.71	65888.65
135	128082.83	99733.17	80556.34	63440.11
130	123043.78	95852.11	77439.68	60991.53
125	117991.10	91976.00	74320.94	58541.26
120	112925.82	88082.27	71198.96	56090.95
115	107865.19	84196.21	68076.15	53641.13
110	102793.34	80306.49	64951.77	51190.55
105	97726.81	76415.31	61827.63	48740.87
100	92661.10	72525.75	58704.37	46293.38
95	87604.16	68637.16	55582.73	43847.21
90	82556.73	64754.30	52463.78	41403.62
85	77522.28	60875.68	49348.29	38961.80
80	72501.53	57006.01	46237.70	36525.31
75	67502.86	53144.42	43133.47	34092.77
70	62526.35	49295.51	40036.50	31667.10
65	57579.05	45461.54	36949.24	29247.45
60	52662.98	41642.99	33873.49	26835.64
55	47785.10	37845.71	30811.61	24433.16
50	42949.52	34072.68	27765.91	22043.01
45	38162.46	30328.12	24739.29	19666.12
40	33431.25	26616.28	21736.34	17304.28

Tabla 6 Resultados de los trabajos límites calculados.

La Tabla 6 Resultados de los trabajos límites calculados. muestra la evolución del trabajo límite calculado según la temperatura y la presión, si dichos números se representaran en curvas nos daría como resultado las Ilustraciones Ilustración 17 y Ilustración 18.

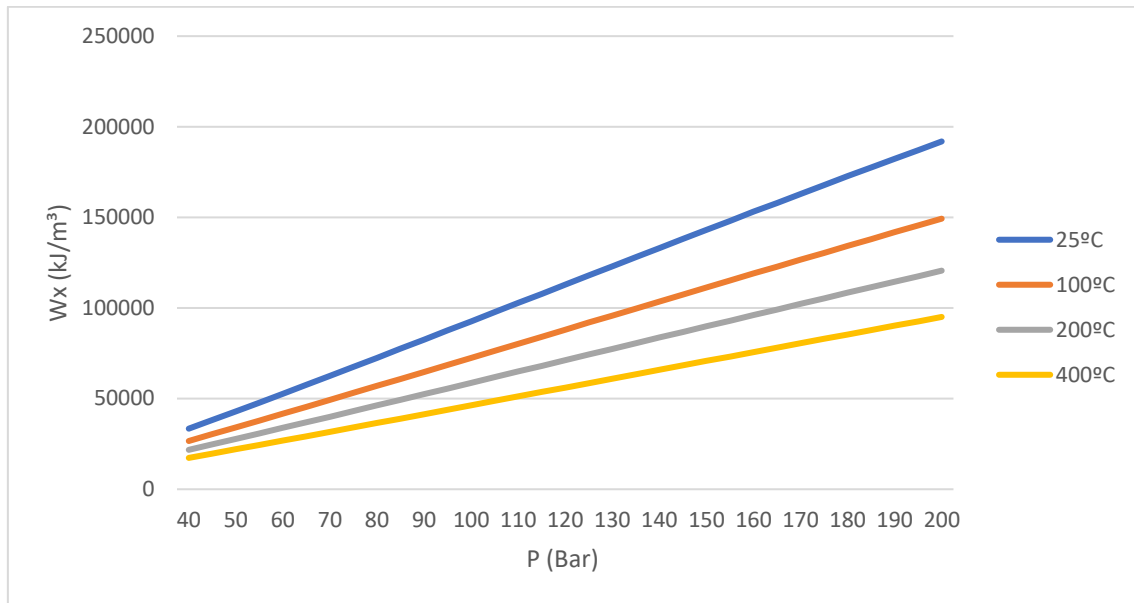


Ilustración 17 Trabajo límite extraíble por unidad de volumen

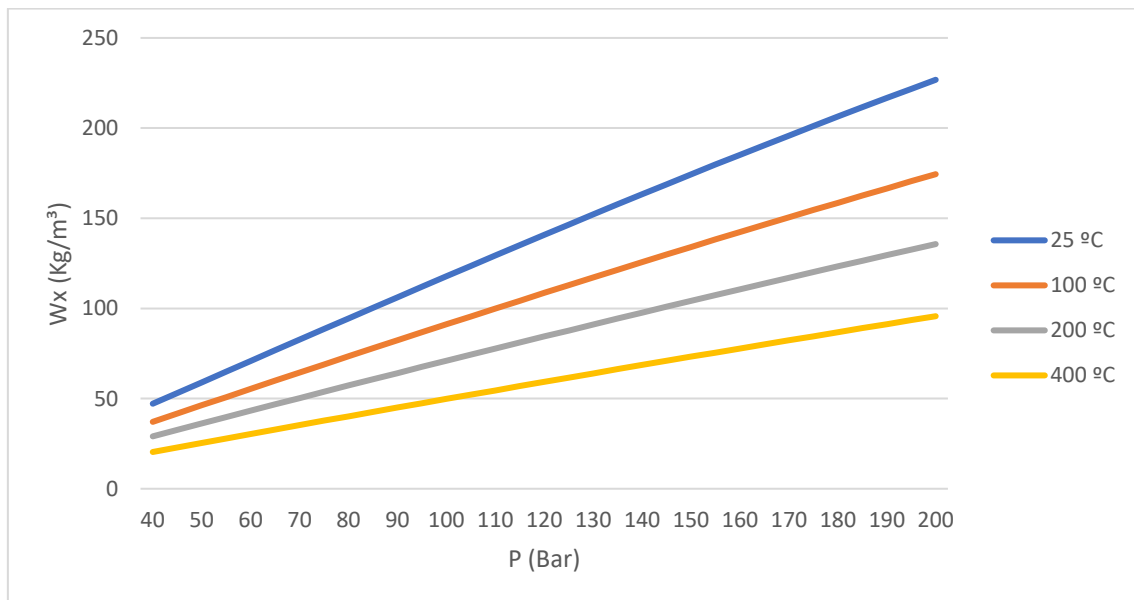


Ilustración 18 Variación de densidad en función de la presión y de la temperatura

La Ilustración 17 muestra la evolución de la exergía del flujo en función de la presión a la que está dicho flujo para cada temperatura. Como se puede observar la exergía por unidad de volumen es directamente proporcional a la presión e inversamente proporcional a la temperatura, esto debido a que, aunque la exergía es mayor conforme aumenta la temperatura, como la Ilustración 18 permite ver la densidad disminuye haciendo que el producto entre la densidad y la exergía disminuya conforme aumenta la temperatura.

Si el proceso fuese a presión constante toda el área bajo la curva sería el trabajo límite producido por la expansión del fluido, por ejemplo, si el fluido a la salida del reservorio tuviese una presión de 200 bar y una temperatura de 400°C el sumatorio de exergías desde los casi 100MJ/m³ hasta condiciones ambiente sería el trabajo aprovechable mientras que si el proceso fuese a volumen constante y por lo tanto, presión variable en cada instante

de tiempo la presión de la entrada a la turbina disminuiría y por lo tanto la exergía a la entrada iría disminuyendo lo que haría que la resultante del trabajo límite sea menor que en el proceso a presión constante.

8.2 Energía almacenada.

Otro aspecto fundamental a considerar es la energía almacenada en el reservorio antes de que se inicie el proceso de expansión. Esta energía almacenada puede ser cuantificada mediante la variación de la energía interna experimentada por el fluido contenido en el reservorio durante la descarga:

$$EA = d(n^{VC} \cdot (U_m^{VC} - U_m^{ref}))$$

Siendo:

EA= Energía almacenada.

U_m^{VC} = Energía interna molar en cada periodo de la descarga.

U_m^{ref} = Energía interna molar de referencia dado un estado definido por una presión de 1 bar y una temperatura de 25°C.

Esto dará una idea de cuanta energía utilizable tenemos con cada uno de los procesos desde un punto de vista termodinámico.

La energía almacenada se va a calcular por unidad de volumen al igual que el trabajo límite para tener un resultado válido para cualquier tamaño de reservorio por lo que la ecuación quedaría:

$$EA = d(\rho^{VC} \cdot (U_m^{VC} - U_m^{ref}))$$

Siendo ρ la densidad que tiene el fluido en cada instante de tiempo.

PRESIÓN (bar)	EA (MJ/m3) 25°C	EA (MJ/m3) 100°C	EA (MJ/m3) 200°C	EA (MJ/m3) 400°C
200	755.02	592.00	471.43	347.69
195	738.45	578.80	460.80	339.71
190	721.71	565.52	450.11	331.70
185	704.79	552.11	439.35	323.65
180	687.72	538.62	428.57	315.56
175	670.45	525.07	417.67	307.45
170	653.06	511.37	406.74	299.28
165	635.49	497.60	395.76	291.09
160	617.76	483.75	384.69	282.87
155	599.87	469.81	373.57	274.60
150	581.85	455.75	362.38	266.30
145	563.67	441.63	351.16	257.96
140	545.32	427.39	339.84	249.59

135	526.86	413.08	328.48	241.18
130	508.31	398.66	317.06	232.73
125	489.59	384.21	305.57	224.24
120	470.74	369.61	294.03	215.72
115	451.81	354.97	282.42	207.16
110	432.74	340.25	270.76	198.57
105	413.59	325.45	259.03	189.93
100	394.32	310.56	247.25	181.26
95	374.99	295.61	235.41	172.56
90	355.57	280.58	223.51	163.81
85	336.07	265.48	211.55	155.03
80	316.51	250.31	199.54	146.21
75	296.88	235.07	187.47	137.35
70	277.21	219.77	175.34	128.46
65	257.48	204.40	163.15	119.52
60	237.72	188.97	150.91	110.55
55	217.93	173.49	138.62	101.54
50	198.10	157.95	126.27	92.50
45	178.26	142.35	113.87	83.42
40	158.41	126.70	101.42	74.30

Tabla 7 Resultados de la energía almacenada calculada.

La Tabla 7 Resultados de la energía almacenada calculada. muestra la evolución del trabajo límite calculado según la temperatura y la presión, si dichos números se representaran en curvas nos daría como resultado la Ilustración 19.

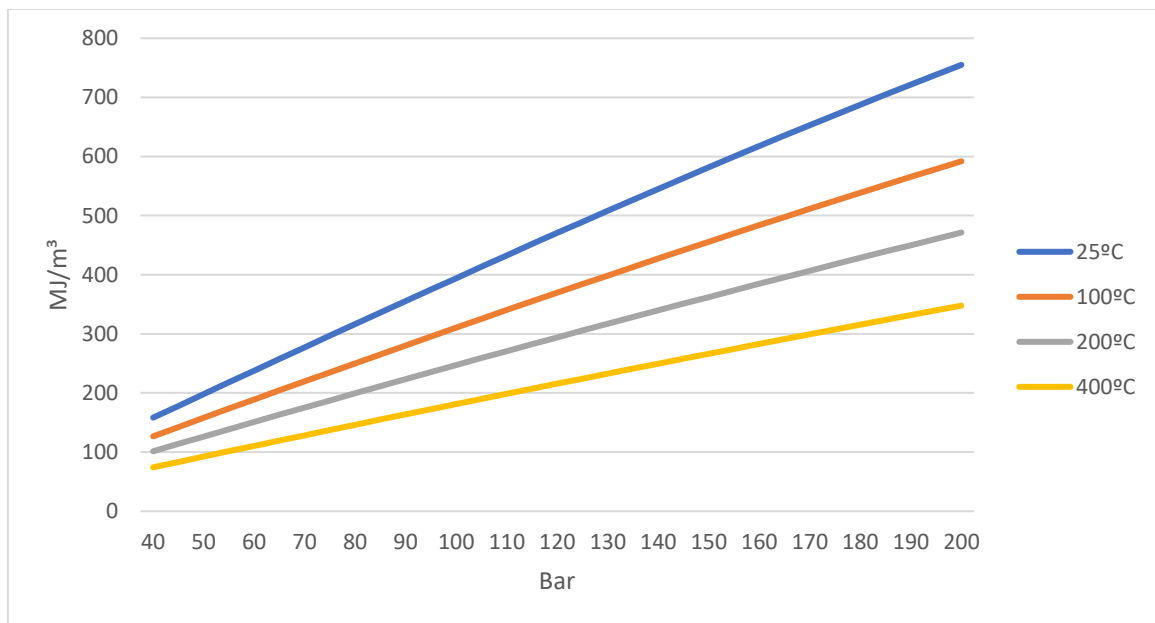


Ilustración 19 Energía Almacenada por el fluido

La energía interna de un fluido está relacionada con su temperatura y presión. Antes de que comience el proceso de expansión, el fluido se encuentra en equilibrio termodinámico

en el reservorio, lo que significa que su energía interna es constante. Sin embargo, esta energía interna puede cambiar cuando se inicia la descarga del fluido.

Durante la expansión, el fluido experimenta una disminución en la presión dependiendo de las condiciones específicas del proceso. Esta disminución en la presión resulta en una reducción en la energía interna del fluido, ya que parte de la energía se utiliza para realizar trabajo contra la presión externa. Esto no pasa si el proceso fuese a presión constante variando el volumen del reservorio durante la descarga.

La Ilustración 19 muestra la tendencia de la energía interna del aire dependiendo de la temperatura y la presión a la que esté dicho fluido. Al igual que el trabajo límite extraíble del sistema, este sigue una tendencia ascendente con la presión, pero con unos niveles de energía mayores con respecto a la antes mencionada.

La cantidad de energía almacenada en el reservorio antes de la expansión puede tener un impacto significativo en el rendimiento del sistema. Una mayor energía almacenada significa que hay más energía disponible para realizar trabajo durante la expansión, lo que puede traducirse en una mayor capacidad para realizar trabajo útil, como la generación de energía mecánica o eléctrica.

Al igual que el trabajo si el proceso fuese a presión constante la energía almacenada en el reservorio por unidad de volumen sería la integral bajo la curva mientras que a volumen constante dicha área iría disminuyendo con el tiempo y, por lo tanto, la energía almacenada sería menor.

8.3 Propiedades del fluido dentro de la membrana.

Para mantener una presión uniforme y constante en todo el reservorio de aire durante un proceso a presión constante, es esencial asegurar que la expansión o contracción del aire se distribuya de manera equitativa. Una forma de lograr esto es mediante el uso de una membrana elástica que contenga un fluido en su interior. Esta membrana actúa como una barrera flexible que permite al fluido expandirse o contraerse según las variaciones de presión, manteniendo así una presión uniforme en todo el sistema.

En el caso específico que nos ocupa, se empleará el CO₂ como el fluido contenido dentro de la membrana elástica. El CO₂ es particularmente adecuado debido a sus propiedades termodinámicas, que permiten que pase fácilmente de estado líquido a gaseoso y viceversa bajo condiciones controladas de temperatura y presión. Para aprovechar estas propiedades, se llevará el CO₂ a la frontera entre el estado líquido saturado y el estado gaseoso saturado.

Este proceso se realizará mediante un intercambio de calor con un reservorio de calor externo. Al agregar calor al CO₂, se promueve su transición del estado líquido al gaseoso, lo que aumenta el volumen dentro del sistema. Por otro lado, al extraer calor del CO₂, se induce la condensación del gas en líquido, lo que disminuye el volumen.

Es importante destacar que el CO₂ se encuentra en estado gaseoso en condiciones ambientales normales. Sin embargo, al someterlo a una presión constante de 70 bares, lo ubicamos en una región específica en la campana de líquido-gas cercana a la presión crítica. Esto significa que se sitúa en un punto donde la diferencia entre su fase líquida y

gaseosa es menos evidente. Por lo tanto, cualquier cambio en la presión o temperatura resultará en un cambio menos significativo en las propiedades del CO₂ en comparación con otros fluidos, como el agua.

Variación v								
Etiquetas de fila	278.45	283.13	287.43	291.42	295.13	298.59	301.83	Total general
40	0.0075							0.0075
45		0.0062						0.0062
50			0.0051					0.0051
55				0.0042				0.0042
60					0.0034			0.0034
65						0.0026		0.0026
70							0.0017	0.0017
Total general	0.0075	0.0062	0.0051	0.0042	0.0034	0.0026	0.0017	0.03

Tabla 8. Propiedades del CO₂ saturado

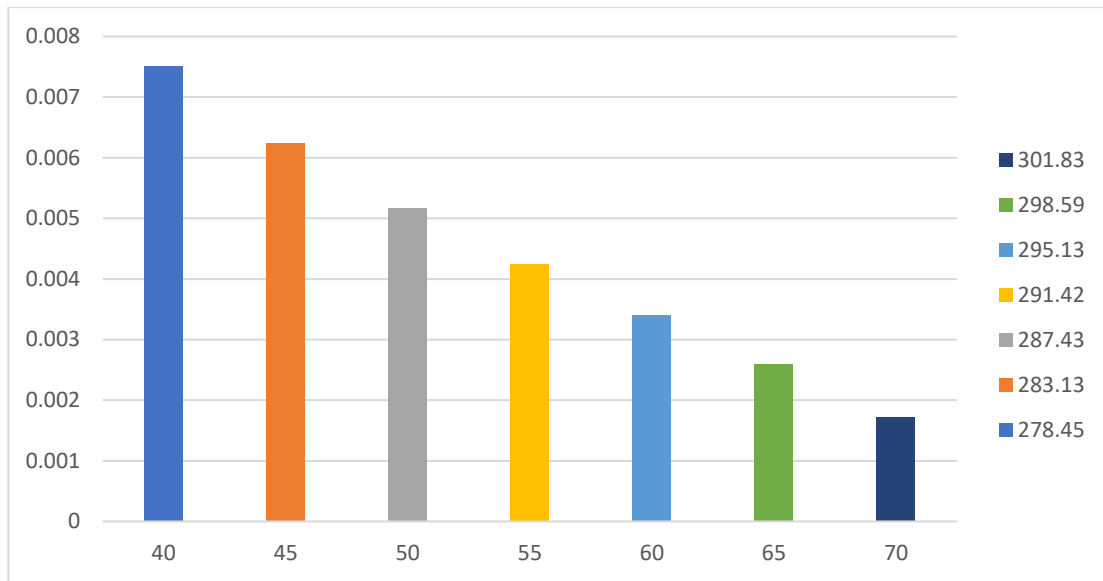


Ilustración 20 Variación V_{esp} CO₂ saturado.

La Tabla 8 muestra lo anteriormente explicado, como se puede observar tanto más aumentemos la presión, menor será la diferencia de volumen que se podrá obtener con el CO₂ lo que lo convierte en un factor limitante en procesos de almacenamiento de aire comprimido a presión constante ya que es necesario esa capacidad de variar el volumen para poder mantener dicha presión constante.

9 . ANÁLISIS TERMODINÁMICO DEL PROCESO DE ALMACENAJE CON AIRE HÚMEDO

Es muy idealista pensar que el fluido con el que se trabajará en una central de almacenamiento energético mediante aire comprimido será aire 100% seco por lo que se va a analizar el comportamiento del fluido según un cierto porcentaje de humedad relativa en la mezcla de entrada. Se tendrán 4 (cuatro) mezclas diferentes de aire seco y agua los cuales serán:

- Caso 1: Aire seco con un 60% de humedad relativa.
- Caso 2: Aire seco con un 50% de humedad relativa.
- Caso 3: Aire seco con un 40% de humedad relativa
- Aire seco con un 30% de humedad relativa.

Para el análisis de dichos casos se calcularán los mismos parámetros que en el apartado 8 viendo cómo evolucionan dichos parámetros en función de la temperatura para unas presiones dadas.

Dado que tenemos la humedad relativa y no la fracción másica de agua en el aire se procederá en primera instancia a calcular dicha fracción.

La fracción másica del agua se puede calcular en función de la presión de vapor a la temperatura que estemos trabajando, la humedad relativa y a la presión. Se estudiará la fracción másica de agua que contiene el aire húmedo procedente del ambiente el cual estará a 25 °C y 1 bar.

La fracción másica se calcula de la siguiente forma:

$$x_{H_2O} = \frac{\varphi \cdot p_{H_2O}^{f+g}(T)}{P}$$

La presión de vapor del aire será una función que dependa de la temperatura de la siguiente forma:

$$p_{H_2O}^{f+g}(T) = 1.6071 \cdot 10^{12} \cdot T^{0.2479} \cdot e^{(-5.8001 \cdot \frac{10^3}{T} - 6.7099 \cdot 10^{-3} \cdot T)}$$

Siendo:

- φ :Humedad relativa del aire.
- $p_{H_2O}^{f+g}(T)$: Presión de vapor del aire en pascales.
- P: Presión del aire en pascales
- T: Temperatura del aire en kelvin

Las distintas composiciones del agua en función de la humedad relativa se pueden ver en la Tabla 9 donde se recogen no solo la fracción de agua si no la mezcla de aire húmedo para cada porcentaje de humedad relativa. La mezcla de aire húmedo que se usará será una mezcla de gases como: Nitrógeno (N₂), Oxígeno (O₂), Argón (AR), Dióxido de carbono (CO₂) y Agua (H₂O):

Humedad relativa	60%	50%	40%	30%	20%
N ₂	0.7407531	0.7437735	0.7460388	0.74792655	0.75034287
O ₂	0.2268515	0.2278275	0.228562	0.22917075	0.22996155
AR	0.0128	0.0128	0.0128	0.0128	0.0128
CO ₂	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006
H ₂ O	0.019	0.015	0.012	0.0095	0.0063

Tabla 9 Fracción molar de los componentes del aire húmedo según la humedad relativa.

A parte, será necesario unas propiedades termodinámicas al igual que en los apartados anteriores para calcular los parámetros que compararemos para analizar el comportamiento del fluido variando la humedad relativa de éste se estudiará un caso cualquiera por ejemplo el aire a 200 °C y variando su presión desde 200 bar hasta 40 bar. Las propiedades termodinámicas y los parámetros a analizar se pueden ver en las siguientes tablas:

EA (MJ/m ³)	PRESIÓN (bar)	DENSIDAD (kg/m ³)	Um (kJ/kg)	ENTALPÍA (kJ/kg)	EXERGÍA FLUJO (kJ/kg)	Wx (kJ/m ³)
475.26	200.00	135.27	3513.40	3661.30	897.32	121380.48
464.50	195.00	132.19	3513.90	3661.40	895.03	118314.02
453.64	190.00	129.08	3514.40	3661.60	892.68	115227.13
442.74	185.00	125.96	3514.90	3661.70	890.27	112138.41
431.80	180.00	122.83	3515.40	3661.90	887.80	109048.47
420.78	175.00	119.68	3515.90	3662.10	885.27	105949.11
409.70	170.00	116.51	3516.40	3662.30	882.67	102839.88
398.54	165.00	113.32	3516.90	3662.50	880.00	99721.60
387.34	160.00	110.12	3517.40	3662.70	877.25	96602.77
376.06	155.00	106.90	3517.90	3662.90	874.43	93476.57
364.75	150.00	103.67	3518.40	3663.10	871.51	90349.44
353.37	145.00	100.42	3518.90	3663.30	868.51	87215.77
341.95	140.00	97.16	3519.50	3663.60	865.40	84080.53
330.45	135.00	93.88	3520.00	3663.80	862.19	80940.67
318.89	130.00	90.58	3520.50	3664.00	858.86	77797.26
307.28	125.00	87.27	3521.00	3664.30	855.40	74651.61

295.62	120.00	83.94	3521.60	3664.50	851.82	71505.18
283.89	115.00	80.60	3522.10	3664.80	848.08	68357.79
272.11	110.00	77.25	3522.60	3665.00	844.19	65210.30
260.28	105.00	73.88	3523.20	3665.30	840.12	62063.87
248.38	100.00	70.49	3523.70	3665.60	835.85	58918.23
236.44	95.00	67.09	3524.30	3665.90	831.38	55775.62
224.43	90.00	63.67	3524.80	3666.20	826.66	52635.92
212.38	85.00	60.24	3525.40	3666.50	821.69	49501.89
200.27	80.00	56.80	3525.90	3666.80	816.41	46372.90
188.12	75.00	53.35	3526.50	3667.10	810.81	43252.66
175.91	70.00	49.88	3527.00	3667.40	804.81	40139.90
163.65	65.00	46.39	3527.60	3667.70	798.39	37038.11
151.34	60.00	42.89	3528.20	3668.00	791.45	33948.46
138.98	55.00	39.39	3528.70	3668.40	783.91	30874.30
126.57	50.00	35.86	3529.30	3668.70	775.65	27817.14
114.11	45.00	32.33	3529.90	3669.10	766.53	24780.38
101.61	40.00	28.78	3530.40	3669.40	756.34	21768.22

Tabla 10 Propiedades termodinámicas a del aire húmedo con un 60% de humedad relativa.

EA (MJ/m ³)	PRESIÓN (bar)	DENSIDAD (kg/m ³)	Um (kJ/kg)	ENTALPÍA (kJ/kg)	EXERGÍA FLUJO (kJ/kg)	Wx (kJ/m ³)
474.36	200.00	135.33	3505.20	3653.00	895.59	121200.19
463.59	195.00	132.24	3505.70	3653.10	893.29	118128.67
452.78	190.00	129.14	3506.10	3653.30	890.93	115054.70
441.94	185.00	126.03	3506.60	3653.40	888.52	111980.18
431.02	180.00	122.90	3507.10	3653.60	886.04	108894.32
420.04	175.00	119.75	3507.60	3653.80	883.51	105800.32
408.97	170.00	116.58	3508.10	3653.90	880.90	102695.32
397.88	165.00	113.40	3508.60	3654.10	878.23	99591.28
386.70	160.00	110.20	3509.10	3654.30	875.48	96477.90
375.49	155.00	106.99	3509.60	3654.50	872.65	93364.82
364.17	150.00	103.75	3510.10	3654.70	869.73	90234.49
352.85	145.00	100.51	3510.60	3654.90	866.72	87114.03
341.44	140.00	97.25	3511.10	3655.10	863.61	83981.75
329.97	135.00	93.97	3511.60	3655.30	860.39	80847.41
318.45	130.00	90.67	3512.10	3655.50	857.06	77710.49
306.87	125.00	87.36	3512.70	3655.70	853.61	74572.22
295.23	120.00	84.04	3513.20	3656.00	850.02	71431.43
283.53	115.00	80.69	3513.70	3656.20	846.28	68288.87
271.78	110.00	77.34	3514.20	3656.50	842.38	65147.14
259.97	105.00	73.97	3514.80	3656.70	838.31	62005.60
248.10	100.00	70.58	3515.30	3657.00	834.05	58865.58
236.18	95.00	67.18	3515.80	3657.20	829.57	55728.02
224.21	90.00	63.76	3516.40	3657.50	824.86	52593.90
212.17	85.00	60.33	3516.90	3657.80	819.88	49463.36
200.09	80.00	56.89	3517.40	3658.10	814.61	46339.09

187.95	75.00	53.43	3518.00	3658.40	809.00	43221.63
175.76	70.00	49.95	3518.50	3658.70	803.01	40113.56
163.52	65.00	46.47	3519.10	3659.00	796.59	37015.15
151.23	60.00	42.97	3519.60	3659.30	789.65	33928.89
138.89	55.00	39.45	3520.20	3659.60	782.12	30857.76
126.49	50.00	35.93	3520.70	3659.90	773.87	27803.60
114.05	45.00	32.39	3521.30	3660.20	764.76	24769.05
101.56	40.00	28.84	3521.90	3660.60	754.58	21759.82

Tabla 11 Propiedades termodinámicas a del aire húmedo con un 50% de humedad relativa

EA (MJ/m³)	PRESIÓN (bar)	DENSIDAD (kg/m³)	Um (kJ/kg)	ENTALPÍA (kJ/kg)	EXERGÍA FLUJO (kJ/kg)	Wx (kJ/m³)
473.66	200.00	135.37	3499.00	3646.80	894.28	121058.68
462.95	195.00	132.29	3499.50	3646.90	891.98	118000.03
452.17	190.00	129.19	3500.00	3647.00	889.62	114930.01
441.33	185.00	126.08	3500.40	3647.20	887.20	111858.18
430.44	180.00	122.95	3500.90	3647.30	884.72	108776.32
419.47	175.00	119.80	3501.40	3647.50	882.18	105685.16
408.46	170.00	116.64	3501.90	3647.60	879.58	102594.21
397.38	165.00	113.46	3502.40	3647.80	876.90	99493.07
386.23	160.00	110.26	3502.90	3648.00	874.15	96383.78
375.04	155.00	107.05	3503.40	3648.20	871.31	93273.74
363.77	150.00	103.82	3503.90	3648.30	868.39	90156.25
352.43	145.00	100.57	3504.30	3648.50	865.38	87031.27
341.06	140.00	97.31	3504.90	3648.70	862.27	83907.49
329.62	135.00	94.03	3505.40	3648.90	859.05	80778.19
318.12	130.00	90.74	3505.90	3649.10	855.71	77646.27
306.56	125.00	87.43	3506.40	3649.30	852.26	74512.24
294.94	120.00	84.10	3506.90	3649.60	848.66	71374.85
283.26	115.00	80.76	3507.40	3649.80	844.93	68238.24
271.53	110.00	77.41	3507.90	3650.00	841.03	65099.93
259.74	105.00	74.03	3508.40	3650.30	836.95	61961.92
247.90	100.00	70.65	3509.00	3650.50	832.69	58826.22
235.99	95.00	67.24	3509.50	3650.80	828.21	55692.15
224.03	90.00	63.83	3510.00	3651.00	823.50	52561.53
212.02	85.00	60.40	3510.50	3651.30	818.52	49434.52
199.95	80.00	56.95	3511.10	3651.60	813.25	46313.77
187.83	75.00	53.49	3511.60	3651.80	807.65	43199.58
175.66	70.00	50.01	3512.20	3652.10	801.66	40093.42
163.43	65.00	46.53	3512.70	3652.40	795.24	36998.54
151.14	60.00	43.02	3513.20	3652.70	788.31	33914.67
138.82	55.00	39.51	3513.80	3653.00	780.78	30845.49
126.43	50.00	35.98	3514.30	3653.30	772.54	27792.90
114.00	45.00	32.43	3514.90	3653.60	763.44	24761.41
101.52	40.00	28.88	3515.40	3654.00	753.27	21752.93

Tabla 12 Propiedades termodinámicas a del aire húmedo con un 40% de humedad relativa

EA (MJ/m ³)	PRESIÓN (bar)	DENSIDAD (kg/m ³)	Um (kJ/kg)	ENTALPÍA (kJ/kg)	EXERGÍA FLUJO (kJ/kg)	Wx (kJ/m ³)
473.11	200.00	135.41	3493.90	3641.60	893.19	120946.86
462.40	195.00	132.33	3494.30	3641.70	890.88	117890.15
451.63	190.00	129.23	3494.80	3641.80	888.52	114823.44
440.83	185.00	126.12	3495.30	3642.00	886.10	111754.93
429.95	180.00	122.99	3495.80	3642.10	883.62	108676.42
419.02	175.00	119.85	3496.20	3642.20	881.08	105597.44
408.03	170.00	116.69	3496.70	3642.40	878.47	102508.66
396.97	165.00	113.51	3497.20	3642.60	875.79	99410.92
385.83	160.00	110.31	3497.70	3642.70	873.04	96305.04
374.66	155.00	107.10	3498.20	3642.90	870.20	93198.42
363.40	150.00	103.87	3498.60	3643.10	867.28	90084.37
352.11	145.00	100.63	3499.10	3643.20	864.26	86970.48
340.74	140.00	97.37	3499.60	3643.40	861.15	83846.73
329.32	135.00	94.09	3500.10	3643.60	857.93	80721.78
317.84	130.00	90.80	3500.60	3643.80	854.59	77592.50
306.30	125.00	87.49	3501.10	3644.00	851.13	74461.96
294.70	120.00	84.16	3501.60	3644.20	847.54	71329.81
283.04	115.00	80.82	3502.10	3644.40	843.80	68195.92
271.33	110.00	77.46	3502.70	3644.70	839.90	65061.17
259.56	105.00	74.09	3503.20	3644.90	835.82	61926.74
247.72	100.00	70.70	3503.70	3645.10	831.56	58793.79
235.83	95.00	67.30	3504.20	3645.40	827.08	55662.48
223.89	90.00	63.88	3504.70	3645.60	822.37	52534.64
211.90	85.00	60.45	3505.30	3645.90	817.39	49411.23
199.84	80.00	57.00	3505.80	3646.10	812.12	46292.46
187.73	75.00	53.54	3506.30	3646.40	806.52	43181.08
175.56	70.00	50.06	3506.80	3646.70	800.53	40076.93
163.35	65.00	46.57	3507.40	3646.90	794.11	36984.09
151.08	60.00	43.07	3507.90	3647.20	787.18	33902.27
138.76	55.00	39.55	3508.50	3647.50	779.66	30834.77
126.38	50.00	36.02	3509.00	3647.80	771.43	27784.59
113.96	45.00	32.47	3509.50	3648.10	762.33	24754.38
101.49	40.00	28.91	3510.10	3648.40	752.17	21747.49

Tabla 13 Propiedades termodinámicas a del aire húmedo con un 30% de humedad relativa

9.1 Trabajo Límite Extraíble y Energía Almacenada.

El procedimiento para el cálculo del trabajo límite extraíble y de la energía almacenada es exactamente el mismo que en los apartados anteriores por lo que no se volverá a escribir el procedimiento. El resultado del trabajo límite extraíble para cada humedad relativa se puede ver en la Ilustración 21 mientras que la energía almacenada se puede visualizar en la Ilustración 22.

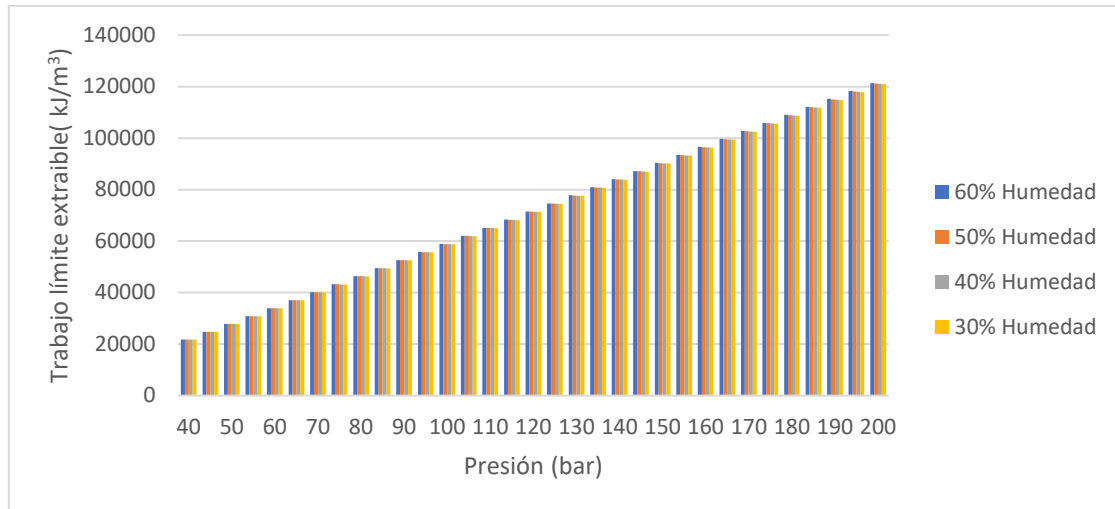


Ilustración 21 Trabajo límite extraíble del aire húmedo.

A simple vista no se puede observar una diferencia grande entre mezclas a excepción de un pequeño pico en algunas presiones donde se ve que sobresale la mezcla de 60% de humedad relativa. No obstante, en las tablas se pueden observar valores diferentes como:

121380.48 kJ/m³ para una mezcla de aire húmedo en 60% de humedad relativa y 200 bar, 121200.19 kJ/m³ para una mezcla de aire húmedo en 50% de humedad relativa y 200 bar, 121058.68 kJ/m³ para una mezcla de aire húmedo en 40% de humedad relativa y 200 bar y 120946.86 kJ/m³ para una mezcla de aire húmedo en 30% de humedad relativa y 200 bar. Se puede observar un pequeño aumento entre el trabajo límite extraíble conforme aumentamos la humedad relativa que puede tener el aire del ambiente.

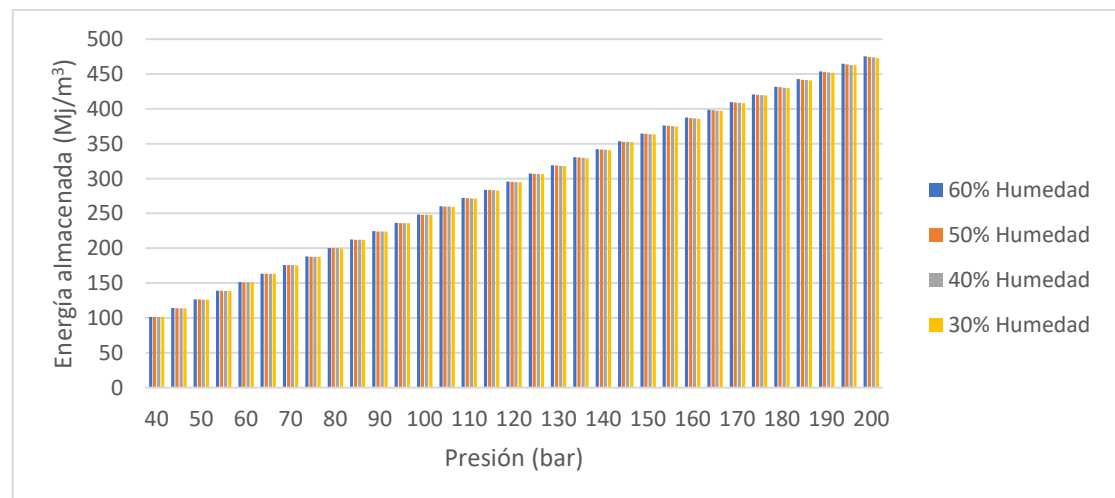


Ilustración 22 Energía almacenada del aire húmedo.

Lo mismo ocurre con la energía almacenada como muestra la Ilustración 22. Esto demuestra que trabajar con aire húmedo a mayor humedad relativa provoca un aumento en las magnitudes molares de la mezcla así como de las resultantes como el trabajo límite extraíble y la energía almacenada.

9.2 EFECTO DE BLOQUEO Y BOMBEO EN TURBINAS

[15] Otro parámetro que se puede analizar para comprobar como varía el funcionamiento del fluido durante el proceso es el caudal que es capaz de descargar el reservorio de aire desde el principio hasta el final de proceso, pues hay dos efectos presentes en las turbinas que se deben de tener en cuenta a la hora de operar. Estos son el bombeo y el bloqueo.

Estos fenómenos dependen de la velocidad del sonido, más específicamente de la velocidad del sonido local la cual se podría definir como la capacidad de propagación de las ondas de presión a lo largo de un medio. En un fluido en estado gaseoso la velocidad local del sonido depende en gran parte de parámetros característicos de dicho gas como puede ser el valor del coeficiente adiabático del gas, o γ ($\frac{C_p}{C_v}$), la constante del gas R_p y la temperatura a la que se encuentre el gas.

A la relación entre la velocidad local del fluido y la velocidad local del sonido se le llama número de Match, de tal forma que:

$$M = \frac{V}{a}$$

Siendo:

- M: número de Match.
- V: velocidad local del fluido.
- a: velocidad local del sonido.

Cuando $M=1$ se dice que el fluido se encuentra en el punto crítico.

Cuando llegamos al punto de bloqueo sónico el caudal que discurre por el conducto de la turbomáquina es el máximo por el que puede circular en dicho conducto dadas unas condiciones de entrada. Esto quiere decir que si aumentáramos la relación de compresión más de la que obtendríamos en el punto de bloqueo sónico no podría circular el fluido.

Al contrario, tendríamos el efecto de bombeo el cual ocurre cuando la relación de compresión disminuye produciendo flujos inestables. El flujo de un fluido a su paso por un conducto depende de la presión a la entrada y la salida por lo que si disminuimos mucho la presión a la entrada o aumentamos la presión de salida hace que el flujo discurra más lentamente por dicho conducto, si la velocidad del fluido disminuye mucho puede ocasionar que el campo de velocidades se vuelva inestable teniendo lugares en los que el flujo se invierta provocando problemas en la operación de la turbina.

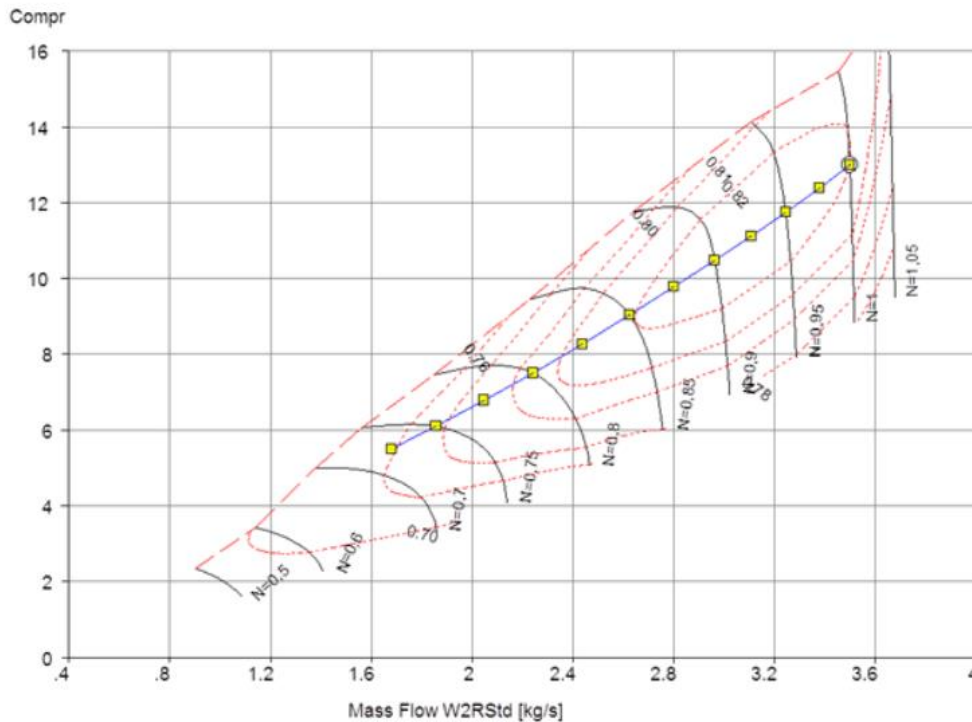


Ilustración 23 Curva característica de turbinas. Con referencia en Politropía: Regulación de la potencia en turbinas de gas de eje doble a régimen constante

Una vez explicado los dos efectos, se dispone a analizar la curva característica de una turbina la cual depende de la relación de compresión y del caudal másico que circula por ella. La Ilustración 15 muestra dicha curva (para varias velocidades de giro), en ella se ven representadas los dos fenómenos anteriormente descritos. La línea roja discontinua que se encuentra a la izquierda de la curva es la línea de bombeo mientras que el final de cada curva de N constante (revoluciones por minuto adimensionales) son los puntos en los que se produce el bloqueo sónico

Entonces, si se alcanza un régimen en el cual, o bien el flujo másico alcanza un valor máximo para un N constante, o bien la relación de compresión disminuye lo suficiente (por diversos motivos ajenos a la entrada de la turbina), aparecería el indeseado efecto de bloqueo.

Por contraparte, si se disminuye el caudal másico para una misma velocidad angular, o se aumenta demasiado la relación de compresión, obtendríamos el efecto de bombeo, donde se invertiría el sentido del flujo.

Esto quiere decir que, manteniendo una velocidad de giro constante, habrá unos límites máximos y mínimos (en términos de relación de compresión y caudal másico) para los cuales deberemos diseñar la descarga del reservorio de aire comprimido.

9.3 Comparación proceso volumen constante y presión constante.

En los apartados anteriores se ha visto como varía el funcionamiento del fluido dependiendo de cómo se modifiquen las condiciones de éste. Sabiendo cómo funciona se va a proceder con un ejemplo para comparar el % de pérdidas que tendríamos si trabajamos a volumen constante que si trabajásemos a presión constante.

Al trabajar con un reservorio de aire a volumen constante corremos el riesgo de que las presiones a la descarga fluctúen lo que provoca un descenso del rendimiento de la máquina térmica turbina, para evitar eso se regula el caudal de descarga del reservorio manteniendo una presión constante pero menor a la que se encuentra el fluido para evitar posibles problemas.

Se analizará el caso de almacenamiento de aire a 200°C y 200 bar. Debido a lo anteriormente explicado el proceso a volumen constante trabajará al 50% de su capacidad total (100 bar) para evitar problemas.

Se le llamará rendimiento del trabajo o rendimiento de la energía almacenada a la división entre los trabajos límites o las energías almacenadas a volumen y presión constante de tal forma: $\frac{V_{cte}}{P_{cte}}$.

	Parámetro	Presión constante	Volumen constante	Rendimiento del trabajo	Rendimiento de la energía almacenada
AIRE HÚMEDO 60% HR	Trabajo limite (kJ/m ³)	121.38	58.92		
	Energía almacenada (MJ/ m ³)	0.48	0.25	0.48	0.52
AIRE HÚMEDO 50% HR	Trabajo limite (kJ/ m ³)	121.20	58.87		
	Energía almacenada (MJ/ m ³)	0.47	0.25	0.48	0.52
AIRE HÚMEDO 40% HR	Trabajo limite (kJ/ m ³)	121.06	58.83		
	Energía almacenada (MJ/ m ³)	0.47	0.25	0.48	0.5
AIRE HÚMEDO 30% HR	Trabajo limite (kJ/ m ³)	120.95	58.79		
	Energía almacenada (MJ/ m ³)	0.47	0.25	0.48	0.52
AIRE SECO	Trabajo limite (kJ/ m ³)	120.61	58.70		
	Energía almacenada (MJ/ m ³)	0.47	0.25	0.48	0.52

Tabla 14 Comparación proceso de presión constante y volumen constante por unidad de volumen.

Se puede observar en la Tabla 14 como tanto el trabajo límite como la energía almacenada tiene una proporción casi de 2:1 comprando el proceso a presión constante y a volumen constante, eso se puede ver en las dos columnas de la derecha. También se puede observar que cuanto menos humedad tiene la mezcla menor es la diferencia, aunque varía muy poco.

También se puede analizar el caso para cualquier tamaño de almacenamiento, aunque los rendimientos no cambiarán si que se puede tener una mejor idea al tener valores para un ejemplo por lo que se analizar el caso de un reservorio de 1000 m³.

	Parámetro	Presión constante	Volumen constante	Rendimiento del trabajo	Rendimiento de la energía almacenada
AIRE HÚMEDO 60% HR	Trabajo límite (kJ)	121380.48	58918.23	0.48	0.52
	Energía almacenada (MJ)	475.26	248.38		
AIRE HÚMEDO 50% HR	Trabajo límite (kJ)	121200.19	58865.58	0.48	0.52
	Energía almacenada (MJ)	474.36	248.1		
AIRE HÚMEDO 40% HR	Trabajo límite (kJ)	121058.68	58826.22	0.48	0.52
	Energía almacenada (MJ)	473.66	247.9		
AIRE HÚMEDO 30% HR	Trabajo límite (kJ)	120946.86	58793.79	0.48	0.52
	Energía almacenada (MJ)	473.11	247.72		
AIRE SECO	Trabajo límite (kJ)	120610.02	58704.37	0.48	0.52
	Energía almacenada (MJ)	471.43	247.25		

Tabla 15 Comparación proceso de presión constante y volumen constante para el ejemplo.

La Tabla 15 muestra la diferencia de trabajo límite y energía que nos encontramos entre procesos de almacenamiento a presión constante y volumen constante. Como se ha comentado antes los rendimientos no varían. Si tuviésemos un reservorio de 1000 m³ y tuviésemos aire seco, por ejemplo, a presión constante tendríamos un trabajo límite aprovechable de 120610.02 kJ y 58704.37 kJ a volumen constantes así como una energía almacenada de 471.43 y 247.25 MJ respectivamente.

10 CONCLUSIÓN

Al igual que en cualquier ciclo de potencia existen varias alternativas para conseguir un mayor trabajo y un mejor rendimiento en el ciclo. Se han estudiado varias de estas alternativas desde el punto de vista termodinámico viendo cómo se comporta el fluido de trabajo y que impacto puede tener en el ciclo.

Esto proyecto se centró en la comparación termodinámica de las alternativas de almacenamiento: a volumen constante y a presión constante. Gracias a ese análisis hemos llegado a una serie de conclusiones dependiendo de qué estuviésemos analizando:

1. **Caudal:** Se ha podido ver que por la propia naturaleza del fluido en máquinas y conductos el sistema está limitado con un máximo y un mínimo que se puede utilizar debido a la aparición de efectos negativos como el bombeo o el bloqueo sónico. Debido a esto el almacenamiento a volumen constante estrangula la salida del reservorio limitando la presión a la que puede salir el caudal para evitar mayores problemas, esto provoca una disminución en la capacidad de generar trabajo y almacenar energía con respecto al proceso a presión constante como se ha visto en el apartado 9.3.
2. **Composición de agua:** Se ha visto que la proporción de agua en la mezcla afecta directamente a las propiedades de la misma. Cuanto mayor sea el porcentaje de agua en la mezcla mayor será el orden de magnitud del trabajo límite o la energía almacenada. Cuanto mayor sea la proporción de agua en la mezcla provoca que la diferencia entre el trabajo generado y almacenamiento de energía del proceso a presión constante y de volumen constante aumente.
3. **Fluido dentro de la membrana:** Aunque el proceso a volumen constante tiene limitaciones en cuanto al caudal que puede suministrar debido a las fluctuaciones de la presión, el proceso a presión constante tiene una limitación parecida a esta y es el fluido dentro de la membrana que se usará para alcanzar la presión constante. Como se ha podido observar en la Ilustración 20 Variación $V_{\text{esp CO}_2}$ saturado. La variación de volumen específico del fluido a utilizar, en este caso CO_2 es limitado, lo que hace que la diferencia de volúmenes que se tengan en el reservorio también lo esté, esto no ocurre en el proceso constante lo que es curioso ya que ninguno de los dos procesos puede aprovechar el 100% de su espacio.

Adicionalmente a esto, se han analizado las propiedades termodinámicas del aire seco variando las presiones para distintas temperaturas en el reservorio de aire:

1. **Presión:** Tiene poco impacto en cuanto a las propiedades termodinámicas como la energía interna o la entalpía, no obstante, influye en la cantidad de aire que podemos meter cada vez, esto se ve reflejado en la densidad ya que al aumentar la presión

aumenta la densidad haciendo que la energía almacenada y el trabajo generado aumenten.

PRESIÓN (bar)	DENSIDAD (kg/m³)	Um (kJ/kg)	ENTALPÍA (kJ/kg)	EA (MJ/m³)	Wx (kJ/m³)
200	226.78	3329.3	3417.5	755.01	191892.16
160	185.18	3336	3422.4	617.76	153088.3
60	70.855	3355	3439.7	237.72	52662.98

Tabla 16 Ejemplo de la acción de la presión.

Esto se puede observar en la Tabla 16 la cual es una recopilación de los datos obtenidos del aire seco a 200°C, aunque la entalpía a 60 bar sea mayor que a 200 bar el impacto es mínimo mientras que el aumento de la densidad es significativo produciendo un aumento del producto.

2. **Temperatura:** Es el caso contrario a la presión, al aumentar la temperatura aumenta las propiedades termodinámicas del fluido, pero eso también hace que la densidad del fluido disminuya haciendo que quepa menos fluido en el reservorio. Esto se puede observar en las ilustraciones de los apartados 8.1 y 8.2.

TEMPERATURA (°C)	DENSIDAD (kg/m³)	Um (kJ/kg)	ENTALPÍA (kJ/kg)	EA (MJ/m³)	Wx (kJ/m³)
400	95.68	3634	3843.1	347.69	95080.90
200	135.68	3474.6	3622	471.43	120610.02
100	174.43	3393.9	3508.6	592.00	149285.92

Tabla 17 Ejemplo de la acción de la presión.

La Tabla 17 muestra lo anteriormente dicho, es una recopilación de tres ejemplos de las propiedades del fluido con 200 bar y cambiándole la presión, se puede observar como la energía interna o la entalpía aumentan conforme aumentamos la temperatura, pero a la densidad le ocurre el efecto contrario dando por consiguiente la disminución del producto entre energía interna y densidad o la entalpía y la densidad.

11 REFERENCIAS

- [1] http://www.sc.ehu.es/sbweb/energias-renovables/temas/almacenamiento_1/almacenamiento_1.html Accedido por última vez del día 5 de junio de 2024.
- [2] Lección 04. Ciclo simple no regenerativo de la turbina de gas, Sistemas de Producción de Potencia, Grado de Ingeniería de la Energía, Escuela Superior Técnica de Ingeniería, Universidad de Sevilla.
- [3] <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/90335/fichero/TFG+SISTEMAS+DE+ALMACENAMIENTO+DE+ENERG%C3%8DA+CON+AIRE+COMP+RIMIDO.+SISTEMAS+MICRO-CAES.pdf> Accedido por última vez del día 5 de junio de 2024.
- [4] VOLLARO, Roberto De Lieto, et al. Energy and thermodynamical study of a small innovative compressed air energy storage system (micro-CAES). *Energy Procedia*, 2015, vol. 82, p. 645-651. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.017>.
- [5] <https://www.cener.com/documentacion/microrred-ficha-407.pdf> Accedido por última vez del día 5 de junio de 2024.
- [6] [https://espanol.libretexts.org/Quimica/Qu%C3%ADmica_Introductoria%2C_Conceptual_y_GOB/Qu%C3%ADmica_para_Tiempos_Cambiantes_\(Hill_y_McCreary\)/08%3A_Oxidaci%C3%B3n_y_Reducci%C3%B3n/8.03%3A_Electroqu%C3%ADmica-Celdas_y_Bater%C3%ADas](https://espanol.libretexts.org/Quimica/Qu%C3%ADmica_Introductoria%2C_Conceptual_y_GOB/Qu%C3%ADmica_para_Tiempos_Cambiantes_(Hill_y_McCreary)/08%3A_Oxidaci%C3%B3n_y_Reducci%C3%B3n/8.03%3A_Electroqu%C3%ADmica-Celdas_y_Bater%C3%ADas) Accedido por última vez del día 5 de junio de 2024.
- [7] L1 Demanda de energía y generación, Cogeneración, Grado de Ingeniería de la Energía, Escuela Superior Técnica de Ingeniería, Universidad de Sevilla.
- [8] Guo, H., Xu, Y., Zhu, Y., Zhou, X., & Chen, H Thermal-mechanical coefficient analysis of adiabatic compressor and expander in compressed air energy storage systems. *Energy*, Volume 244, Part B. 2022, 122993, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122993>.
- [9] Tema 2: Fluidos caloportadores, Tecnología Energética, Grado de Ingeniería de la Energía, Escuela Superior Técnica de Ingeniería, Universidad de Sevilla.
- [10] Shiwei Hu, Weiqing Xu, Maolin Cai, Guanwei Jia, Energy efficiency and power density analysis of a tube array liquid piston air compressor/expander for compressed air energy storage, *Journal of Energy Storage*, Volume 55, Part C, 2022, 105674, ISSN 2352-152X. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105674>.
- [11] Menéndez, J.; Loredó, J. Advances in Underground Energy Storage for Renewable Energy Sources. *Appl. Sci.* 2021, Volume 11, 5142. <https://doi.org/10.3390/app11115142>.
- [12] MILEWSKI, Jaroslaw; BADIYDA, Krzysztof; SZABŁOWSKI, Łukasz. Compressed Air Energy Storage Systems. *Journal of Power Technologies*, [S.l.], v. 96, n. 4, p. 245--260, dec. 2016. ISSN 2083-4195. Available at: <https://papers.itc.pw.edu.pl/index.php/JPT/article/view/697> Date accessed: 05 July 2024.
- [13] https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/prensa/estrategiaalmacenamiento_tcm30-522655.pdf. Accedido por última vez el día 5 de junio de 2024.

- [14] <https://www.mundocompresor.com/compresores-vacio-gases-aire-comprimido-industria/hydrostor-instala-primer-sistema-mundo-almacenamiento-submarino> Accedido por última vez del día 5 de junio de 2024.
- [15] GUTIÉRREZ MARTÍNEZ, Ignacio. Análisis del punto de bloqueo sónico en turbomáquinas axiales mediante modelos de orden reducido. 2020, E.T.S.I. Industriales (UPM).
- [16] http://manuelvdf.blogspot.com/2012/03/regulacion-de-la-potencia-en-turbinas_14.html Accedido por última vez el día 5 de junio.
- [17] Cord Kaldemeyer, Cynthia Boysen, Ilja Tuschy, Compressed Air Energy Storage in the German Energy System – Status Quo & Perspectives, Energy Procedia, Volume 99, 2016, Pages 298-313, ISSN 1876-6102, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.120>.
- [18] <https://ecoinventos.com/hydrostor/> Accedido por última vez el día 5 de junio de 2024.
- [19] <https://www.era.ac.uk/resources/event-resources/mdes2024/> . Accedido por última vez el día 5 de junio de 2024
- [20] <https://www.omie.es/>. Accedido por última vez el día 10 de noviembre de 2023.