



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESTUDIO DE ACUMULADORES DE ENERGÍA

Trabajo de fin de grado de Ingeniería Eléctrica

Realizado por:
Isaac Ibáñez Sales

Tutorizado por:
Salvador Cuco Pardillos

Fecha: Septiembre de 2019, Valencia

Contenido

Contenido.....	1
Tabla de Imágenes	3
Resumen.....	5
Introducción	5
Generador eléctrico	7
Central hidroeléctrica.....	9
Historia	9
Actualidad	10
Desventajas	10
Nuevos desarrollos.....	11
Conclusión	13
Almacenamiento ferroviario (ARES).....	13
Composición del sistema.....	14
Conclusión	15
Almacenamiento electroquímico (Baterías)	16
Conceptos necesarios.....	17
Baterías Plomo-ácido	19
Características	19
Baterías de níquel.....	21
Baterías de Litio.....	23
Baterías Li-ion (LiCoO ₂).....	25
Baterías Li-ion (LiMn ₂ O ₄)	26
Baterías LFP (LiFePO ₄).....	26
Tabla comparadora de baterías de Li	27
Baterías en desarrollo	27
Baterías de estado sólido	27
Almacenamiento de energía mediante aire comprimido (CAES)	28
Contenedor isobárico.....	30
Contenedor isocórico	30
Configuraciones de las plantas.....	32
Procesos diabáticos	32
Proceso adiabático	33
Acumuladores de aire comprimido subacuáticos	34
Almacenamiento mediante aire en estado líquido.....	37
Funcionamiento	38

Implementación	39
Volantes de energía cinética (flywheels)	41
Funcionamiento	41
Componentes	43
Actualidad	43
Acumuladores de energía térmica	45
Intercambiadores de calor	47
Transmisión de calor en sistemas basados en PCMs	48
PCMs a temperatura subambiente	50
PCMs a temperatura ambiente	50
PCMs en un rango de temperatura moderado	51
PCMs a altas temperaturas	53
Aplicaciones.....	53
Conclusión	54
Almacenamiento de calor sensible	55
Estanques solares.....	56
Estanque solar de gradiente de salinidad	57
Proyecto de aplicación	62
Captador solar	63
Demanda	66
Cargas térmicas	66
Cargas por transmisión.....	67
Cargas térmicas por ventilación	68
Cargas térmicas por infiltración	68
Demanda de la instalación	68
Consumo de ACS (agua caliente sanitaria).....	71
Volumen de la instalación	72
Conclusión	74
Anexos.....	75
Anexo 1: ficha técnica del material de cambio de fase (Climsel 48).....	75
Anexo 2: ficha técnica del captador solar (CAOTEC CAO).....	75
Anexo 3: ficha de fluido transmisor (Etilenglicol)	75
Bibliografía	84
Libros	84
Publicaciones.....	84
Internet	84

Tabla de Imágenes

Ilustración 1 Capacidad de almacenamiento instalada en EEUU según Energy Information

<i>Administration</i>	6
Ilustración 2 Tabla de comparación	6
Ilustración 3 Disposición del bobinado del estator	7
Ilustración 4 Imágenes descriptivas de rotor	7
Ilustración 5 Máquina síncrona de polos salientes. Revista ABB nº1 1992	8
Ilustración 6 Esquema de una central hidroeléctrica.....	9
Ilustración 7 Central hidroeléctrica de Okinawa, 30 MW	11
Ilustración 8 Diagrama de sistema en el fondo marino	12
Ilustración 9 Almacenamiento de energía mediante membrana enterrada	12
Ilustración 10 Visualización de sistema avanzado ferroviario de almacenamiento de energía .	14
Ilustración 11 Vehículo lanzadera	14
Ilustración 12 2 lanzaderas con 7 vagones de gran tonelaje	15
Ilustración 13 Pila de Volta.....	16
Ilustración 14 Representación de capacidad vs velocidad de descarga	18
Ilustración 15 Componentes de una batería plomo-ácido.....	19
Ilustración 16 Muestra del comportamiento de una batería de ácido-plomo según la temperatura (Capacidad inicial a 23 °C)	20
Ilustración 17 Capacidad de una celda durante su vida útil.....	20
Ilustración 18 a) descarga de NiCd (23 °C) b) efecto de depresión del voltaje.....	21
Ilustración 19 Descarga de batería 1100 mAh NiMH y batería 700 mAh NiCd	22
Ilustración 20 Comparación de ciclo de carga de NiCd y NiMH	23
Ilustración 21 Evolución de la capacidad de las celdas de 18650	23
Ilustración 22 Comparativa Li-ion con otras tecnologías	23
<i>Ilustración 23 Capacidad según C-rating</i>	24
Ilustración 24 Gráfica de descarga de baterías Li-ion según sus electrodos.....	25
Ilustración 25 Estructura química del LiCoO ₂	25
Ilustración 26 Estructura del LiMn ₂ O ₄	26
Ilustración 27 Estructura LiFePO ₄	26
Ilustración 28 Tabla de comparación entre baterías de litio	27
Ilustración 29 Gráfica de contenedores de aire comprimido	29
Ilustración 30 Diagrama de contenedor isobárico	30
Ilustración 31 Diagrama de contenedor isocórico	31
Ilustración 32 Tabla de comparación	31
Ilustración 33 Esquema actual de una central	32
Ilustración 34 Propuesta de mejora del esquema actual.....	32
Ilustración 35 Gráfica de repetición de procesos de expansión y compresión	33
Ilustración 36 Sistema de almacenamiento adiabático	33
Ilustración 37 expansión adiabática con expansión a temp. Ambiente.....	34
Ilustración 38 Recipiente flexible de diámetro 1.8 m diseñado en la Universidad de Nottingham (2011)	35
Ilustración 39 Almacenes rígidos de roca seca con lastres en Lago Ontario	36
Ilustración 40 Esquema propuesto anteriormente.....	36
Ilustración 41 Esquema de almacenamiento en estado líquido	37
Ilustración 42 Comparación de exergía en función de la presión.....	37

Ilustración 43 Comparación en función de temperatura ($T_a=25^{\circ}\text{C}$).....	38
Ilustración 44 Esquema de implementación en una planta solar térmica.....	39
Ilustración 45 Diagrama de combinación.....	40
Ilustración 46 Comparación de distintos fluidos.....	40
Ilustración 47 Configuración del volante	43
Ilustración 48 Planta de regulación de red mediante volantes (20 MW)	44
Ilustración 49 Comparación PCM y agua	46
Ilustración 50 Gráfica de sobre enfriamiento	47
Ilustración 51 Ácido láurico (dodecanoico) siendo derretido desde la derecha a 60°C	48
Ilustración 52 Distintas posibilidades para mejorar la transferencia de calor.....	49
Ilustración 53 Yokohama Landmark Tower b) Simplificación del sistema de enfriamiento	50
Ilustración 54 Efecto de regulación mediante PCM en agosto durante 8 días en Ljubljana (Slovenia).....	51
Ilustración 55 Perfil entalpía-temperatura de $\text{NaCH}_3\text{COO}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ diluido incluyendo sobre enfriamiento y solidificación	52
Ilustración 56 Perfil de entalpía relativa para un ciclo completo de $\text{NaCH}_3\text{COO}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ diluido. 52	52
Ilustración 57 Planta solar Andasol de 150 MW ubicada en Aldeire, Granada	54
Ilustración 58 Representación de un estanque solar.....	57
Ilustración 59 Esquema del método de redistribución	59
Ilustración 60 Intercambiador de calor externo	60
Ilustración 61 Intercambiador de calor interno	60
Ilustración 62 Intercambiador de calor interno en la zona gradiente	60
Ilustración 63 Esquema de sistema de calefacción de distrito.	62
Ilustración 64 Representación gráfica del funcionamiento de un captador plano.....	63
Ilustración 65 Visualización de sombra solar producida por los captadores.....	64
Ilustración 66 Diagrama del sistema de captación	65
Ilustración 67 Colectores sobre el terreno, Martal en Dinamarca.....	65
Ilustración 68 Comportamiento del Climsel 48.....	66
Ilustración 69 Diagrama de balance térmico para una vivienda.....	66
Ilustración 70 Cargas térmicas por transmisión a través de los cerramientos	67
Ilustración 71 Demanda del mes de enero (3009 Kwh).....	69
Ilustración 72 Demanda del mes de febrero (2522 Kwh)	69
Ilustración 73 Demanda del mes de marzo (2239 Kwh)	70
Ilustración 74 Demanda de noviembre (2841 Kwh)	70
Ilustración 75 Demanda de diciembre (2889 Kwh).....	70
Ilustración 76 Demanda térmica bruta en invierno con temperatura de consigna e 17°C	71
Ilustración 77 Valores recomendados por CTE	71
Ilustración 78 Gráfica de acumulación de energía anual.....	73

Resumen

Actualmente en la época de constante progresión tecnológica en la que vivimos los recursos que necesitamos y demandamos de nuestro planeta son cada vez mayores, el consumo energético crece conforme a tal demanda, por lo que cada vez es más imprescindible el almacenamiento de esta energía generada.

Además, la reciente preocupación por el efecto del cambio climático en nuestro planeta es otro aliciente para el desarrollo de estos sistemas, ya que el auge de las energías renovables va de la mano de los acumuladores, debido a las irregularidades del clima y los horarios bastante establecidos en los que la demanda de energía aumenta.

Esta preocupación también impulsa otros movimientos como el de la movilidad sostenible, para evitar los gases producidos por la combustión del petróleo y sus derivados. Generando así un mercado que vuelve a necesitar de una constante mejora en sus prestaciones de almacenamiento de energía.

Estos son solamente 2 ejemplos de cómo la energía que producimos en muchos casos nos interesa reservarla para poderla consumir en el momento que deseemos.

Introducción

Este desarrollo tecnológico el cuál se basa en aumentar las facilidades para el ser humano viene ligado de mayores exigencias energéticas de los aparatos que conforman nuestro día a día a medida que el tiempo transcurre, esto en muchos casos significa que los aparatos que dependen de almacenar la energía para poder utilizarla cuándo y dónde queramos necesitan almacenar unas cantidades mayores de energía, ya sea de manera mecánica, química, térmica o de distintos métodos.

Los acumuladores de los que vamos a hablar tienen su principio fundamental en la ley de la conservación de la energía, dónde trataremos de almacenar energía de otros tipos, para después transformarla en energía eléctrica, esto viene dado por la imposibilidad de almacenar energía eléctrica.

En los próximos años se espera que exista un crecimiento duradero y viable para el almacenamiento de energía comercial, haciendo así que la red eléctrica se pueda adaptar a la entrada de las tecnologías renovables, eólica y fotovoltaica principalmente supliendo de esta manera la intermitencia natural que existe en estos casos, ya que no hay luz solar las 24h del día ni el viento es constante.

Figure ES1. U.S. large-scale battery storage capacity by region (2003–2017)

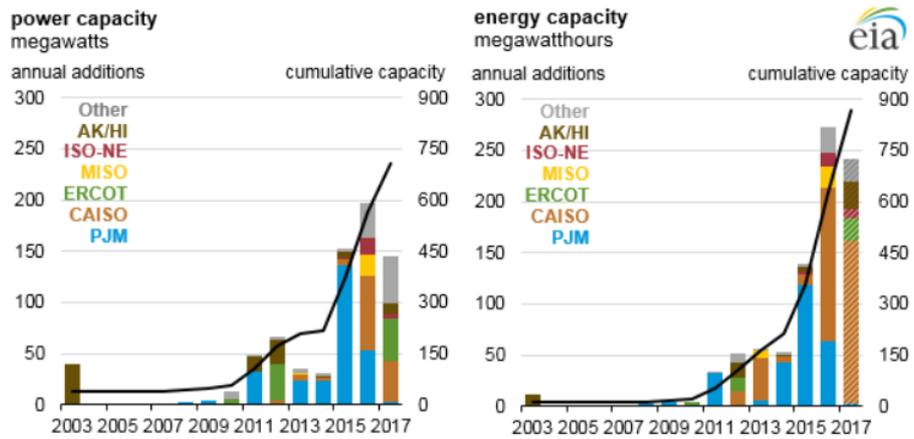


Ilustración 1 Capacidad de almacenamiento instalada en EEUU según Energy Information Administration

Varias tecnologías acumulativas están disponibles para hacer frente a los requisitos de la red eléctrica. En el siguiente gráfico nos podemos hacer una idea de las características de algunas de las características que trataremos a continuación:

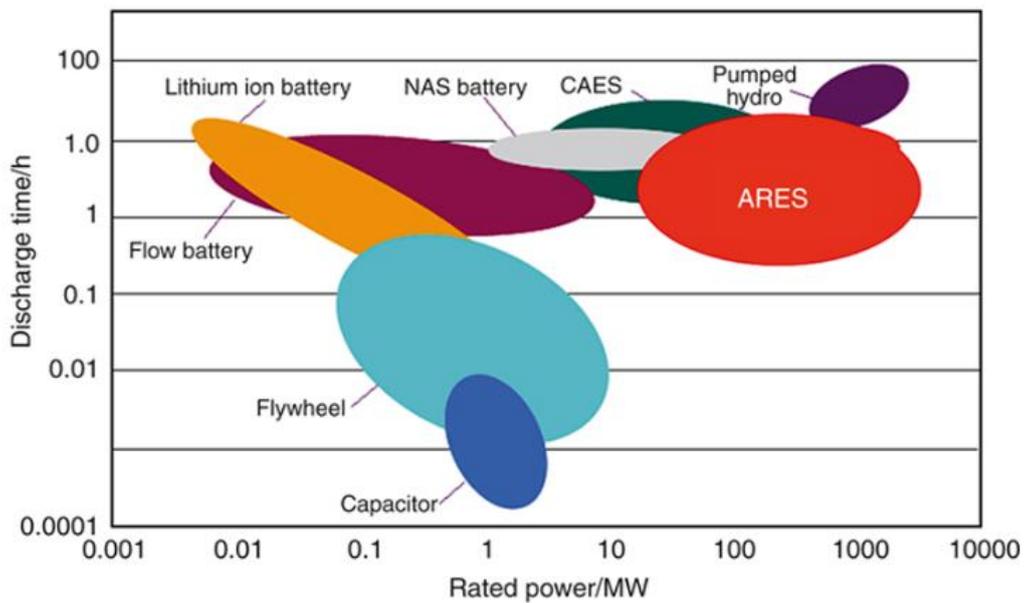


Ilustración 2 Tabla de comparación

Generador eléctrico

De las distintas maneras de almacenar la energía eléctrica que vamos a explicar, la energía eléctrica es transformada en energías distintas, cómo podría tratarse de energía cinética, potencial, química...

Vamos a continuación a hablar de las máquinas síncronas de corriente alterna, ya que estas máquinas son las más utilizadas como generador eléctrico debido a su gran rendimiento. A su vez, también pueden ser utilizadas como motores eléctricos habilitando así simplemente por esta característica tecnologías que aprovechan esa naturaleza reversible para almacenar y consumir energía con gracias a la ayuda de esta máquina.

En lo referente al funcionamiento, al tratarse de una máquina de corriente alterna posee las características de estas. En el estator se disponen bobinas de manera circular, aplicando corriente alternativamente y ordenadamente, conseguiremos un campo magnético giratorio el cual estará acompañado por otro campo magnético en el rotor, la interacción entre estos 2 campos es lo que genera el movimiento de la máquina, o al revés, este movimiento produce la energía.

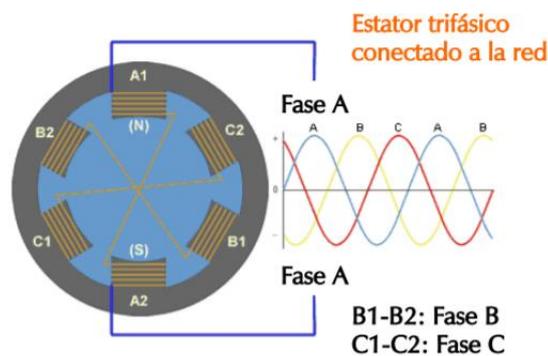


Ilustración 3 Disposición del bobinado del estator

En el rotor, los polos magnéticos se pueden disponer de distintas maneras, de polos salientes o cilíndricos. Las características de la máquina varían así y con ello sus aplicaciones.

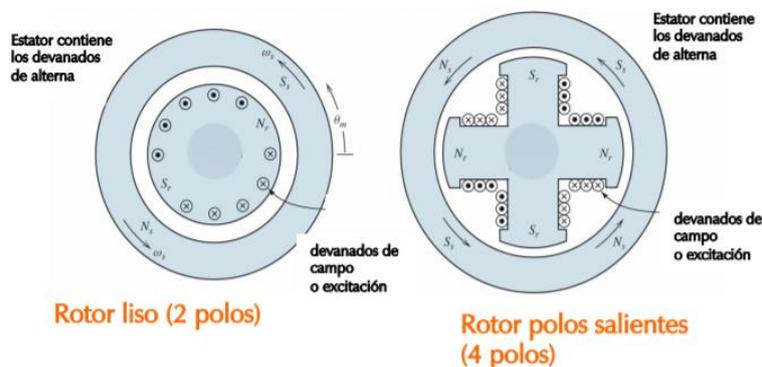


Ilustración 4 Imágenes descriptivas de rotor

El funcionamiento de esta máquina se basa en la ley de Faraday, para crear una tensión inducida en el estator debemos crear un campo magnético giratorio en el rotor. Para alimentar el rotor lo más común es utilizar un juego de anillos y escobillas rozantes, también se pueden utilizar imanes permanentes evitando así la necesidad de los últimos elementos nombrados, con la desventaja de que las potencias que podemos alcanzar mediante imanes permanentes no son comparables.

Las máquinas de polos salientes son máquinas con una velocidad de giro lentas pero muy potentes, utilizadas por ejemplo en centrales hidroeléctricas como generadores, esto es debido al gran número de polos que suelen tener en el rotor.

La cantidad de polos va ligada directamente a la velocidad de giro, ya que al tratarse de una máquina síncrona el campo giratorio del rotor y del estator no tienen un desfase, es decir, si tenemos un motor conectado a 50 Hz con 1 par de polos girará a 3000 rpm, con 2 pares de polos a 1500 etc.

$$V = \frac{60 * \text{Frecuencia}}{n^{\circ} \text{ de pares de polos}}$$

Las máquinas de rotor cilíndrico son utilizadas en aplicaciones donde una mayor velocidad sea requerida, como en las turbinas de generación de las centrales de vapor.

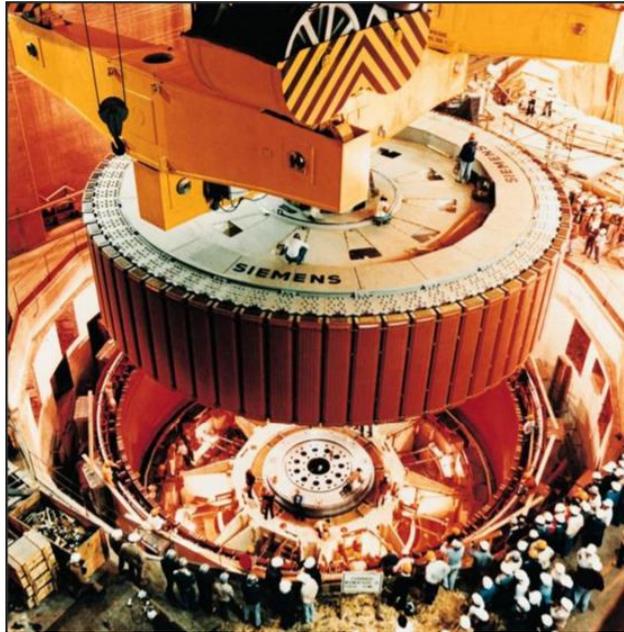


Ilustración 5 Máquina síncrona de polos salientes. Revista ABB nº1 1992

La imagen que hemos visto se trata de un generador trifásico de una central hidroeléctrica, en concreto de la central de Itaipú situada en el río Paraná en la frontera entre Brasil y Paraguay, esta es una de las 20 turbinas que posee, cada una de ellas gira a una velocidad de 90 rpm y tiene una potencia de 700 MW, se trata de una máquina que consta de 40 pares de polos en el rotor y genera a una frecuencia de 60 Hz.

Central hidroeléctrica

En estas centrales la energía se obtiene de la transformación de la energía potencial de una masa de agua situada en un desnivel superior, al verter el agua del nivel superior al inferior se hace pasar el agua por unas turbinas conectadas a un generador síncrono como el visto en la foto anterior.

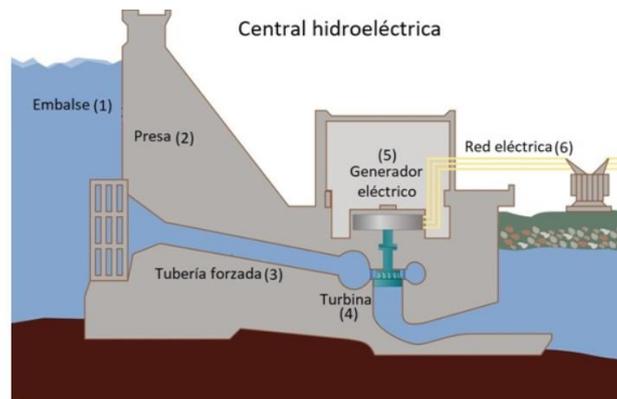


Ilustración 6 Esquema de una central hidroeléctrica

Al hablar de estas centrales hay distintas distribuciones y construcciones, aunque todas se basen en el mismo principio de funcionamiento, a nosotros nos afectan las centrales hidroeléctricas de bombeo, estando formada por los mismos componentes, pero con la variación de que las máquinas síncronas que actúan como generador eléctrico también son utilizadas como bombas de agua para subir así el agua.

Podemos clasificarlas en:

- Centrales de bombeo puro, las cuales no tienen la posibilidad de actuar simplemente como una central hidroeléctrica, sino que necesitan de bombear el agua previamente.
- Centrales mixtas con bombeo, las cuales actúan como centrales hidroeléctricas normalmente, pero tienen la posibilidad de bombear el agua al nivel superior, bien mediante las máquinas síncronas actuando como turbinas reversibles o bombas auxiliares.

Historia

Los primeros sistemas aparecieron en Austria, Italia y Suiza por 1890, entonces se utilizaban generadores y bombas separados, desde 1950 se cambió esta metodología por una turbina reversible que podía actuar como cualquiera de las 2 máquinas.

A partir de 1960 con el crecimiento en la investigación de las centrales nucleares esta opción se presentaba como un gran complemento debido a su flexibilidad.

Japón ha sido el pionero de esta tecnología desde hace tiempo, junto con China y Estados Unidos, a partir de 1970 la tendencia dominante varió de la construcción de centrales híbridas,

las cuáles afectaban a los ríos hacia las centrales de bombeo puro, esto fue debido a la creciente preocupación medioambiental.

Actualidad

Para entender la explotación económica que estas centrales realizan hay que entender la discriminación horaria que ofrecen las compañías al contratar la energía, haciendo una separación en los precios dependiendo de las horas del día, esta variación viene dada por las horas en las que la demanda es superior, siendo estas horas punta y el resto de horas del día horas valle.

En las horas valle la energía es más barata por lo que las centrales de bombeo se dedican a comprar energía para subir el agua y así acumular energía que será transformada en electricidad durante las horas punta, dónde la electricidad generada se venderá a un mayor precio. Aunque en un ciclo de bombeo las pérdidas energéticas son del orden del 30%, la relación económica entre horas punta/valle es suficientemente grande para vencer esas pérdidas energéticas.

Para el sistema eléctrico este tipo de centrales son una pequeña ayuda, ya que en las horas de mayor demanda energética suponen un apoyo sin necesidad de incorporar nuevos elementos de ayuda, proporcionando así una mayor garantía a su sostenibilidad. Además, en caso de un pico de demanda en el que se necesite una rápida variación de la central de generación, este tipo de centrales tienen un margen de maniobra inferior al resto de centrales, estas facilidades permiten almacenar grandes cantidades con unos costes de operación y de mantenimiento bajos, haciendo que el costo nivelado del almacenamiento de energía sea en este remedio mucho menor que en el resto de tecnologías.

Desventajas

Una de las desventajas de este recurso sería la dependencia de un terreno adecuado, en el que debe de existir un desnivel de entre 200 y 400 metros con reservas de volúmenes del orden de $10 \times 10^6 \text{ m}^3$, también tener en cuenta que es una inversión de capital grande, que, aunque los costes de mantenimiento y operación sean bajos suele tardar décadas en amortizarse. Además de que el impacto medioambiental que estas centrales provocan es bastante notable, ya que normalmente requieren de intervenir el flujo natural de un río para crear una reserva, lo cual a su vez puede tener otros problemas, cómo el impacto sobre la vida animal del río y la calidad del agua ya que al bombearla la temperatura aumenta, además de la posibilidad de recoger sedimentos del fondo de la reserva.

Otro problema es que actualmente la mayoría de todas estas centrales hidroeléctricas se basan en el movimiento de agua dulce, siendo esta minoritaria en nuestro planeta, es por eso por lo que algunas de las nuevas investigaciones van enfocadas a utilizar las corrientes, oleaje y todo lo que el mar nos pueda ofrecer para almacenar energía, teniendo en cuenta la naturaleza corrosiva del agua marina.

Nuevos desarrollos

Se están desarrollando nuevas maneras de almacenar la energía hidráulicamente, cómo las centrales de agua de mar, en las cuales hay distintas propuestas:

- Utilizar el agua del mar como la reserva inferior y construir una presa superior a una altura de al menos unos 150 m.



Ilustración 7 Central hidroeléctrica de Okinawa, 30 MW

- Utilizar el agua del mar cómo reserva superior, y hacer un anillo de diques hasta 50 metros por debajo del mar dónde dragar el agua y hacer así una especie de isla de generación, utilizando energía para vaciar el dique y generando al dejar entrar el agua.
- Almacenar el agua en un recipiente con aire, al entrar el agua en el recipiente el aire es comprimido aumentando su presión, esto sustituiría la reserva superior de agua, eliminando así la dificultad de un terreno adecuado gracias a la combinación con el aire comprimido.

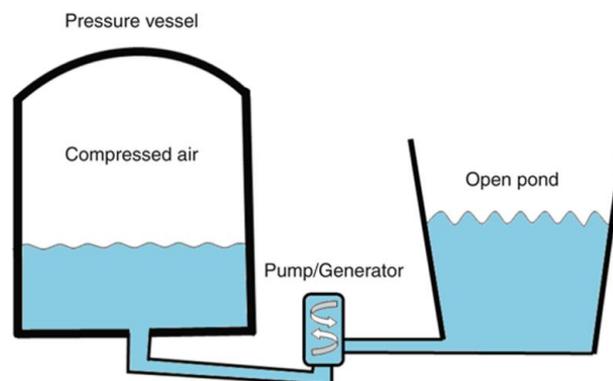


Diagrama de sistema de aire comprimido

- Otro concepto innovador es utilizar la presión en el fondo del mar para almacenar la energía de turbinas eólicas de alta mar, consiste en colocar un recipiente hueco en el fondo del mar, para vaciar el tanque utilizaría energía eléctrica, que recuperaría al dejar llenar el tanque. La propuesta del MIT habla de esferas de 25-30 m de diámetro a unas profundidades de 400 m generando así 6MWh.

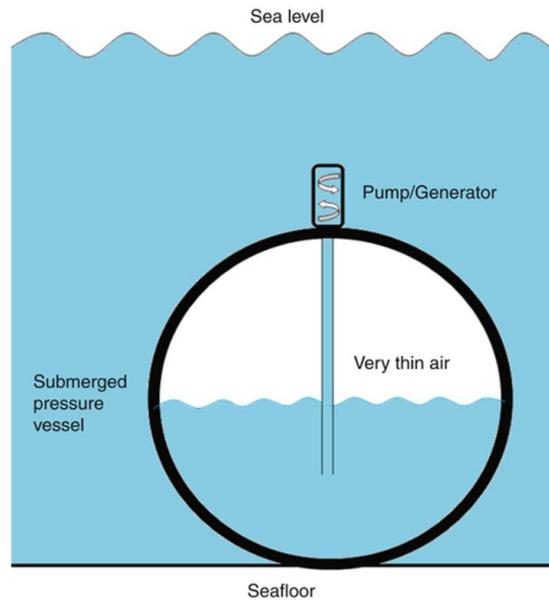


Ilustración 8 Diagrama de sistema en el fondo marino

- Almacenamiento de energía mediante una membrana enterrada, utilizando energía para meter el agua en la membrana, levantando así el suelo situado encima de ella, la generación se realiza al dejar salir el agua por las turbinas.

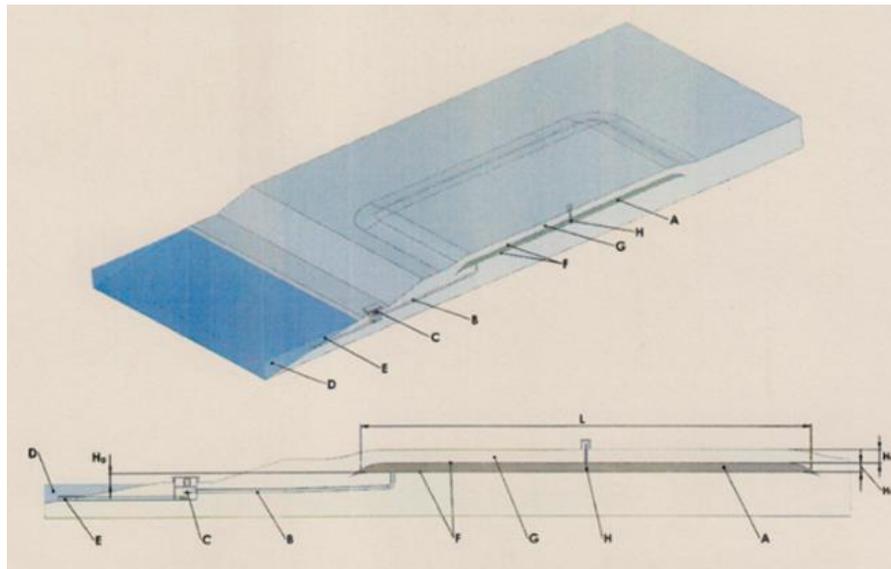


Ilustración 9 Almacenamiento de energía mediante membrana enterrada

- Almacenamiento de energía en lagunas de aguas poco profundas, en este caso se trataría de utilizar las mareas del mar para almacenar agua en una laguna

Conclusión

La conclusión que podemos obtener es que las centrales hidroeléctricas convencionales funcionan de manera excelente hoy día, habiendo probado ya ser una tecnología con una alta investigación desarrollo y rendimiento, siendo capaces de almacenar energía del orden de 1 día vista, pero la limitación del terreno o del impacto medioambiental hace que su implementación sea mucho más costosa. El almacenamiento convencional no será de gran importancia en el sector de almacenamiento distribuido al que se le demanda un aumento de capacidades constante tan rápidamente. En lo referente a las innovaciones que hemos comentado aún no han sido probadas en el mercado, pero si consiguen mantener el buen rendimiento el margen de beneficio económico ya obtenido por esta metodología sería un gran avance, sobre todo al deshacerse de la limitación terrenal.

Almacenamiento ferroviario (ARES)

Para este método al igual que en el último explicado nos vamos a aprovechar de la energía potencial que una masa puede guardar al elevar su altura. En estas infraestructuras nuevamente es clave el uso que tienen los generadores síncronos adquiriendo el papel tanto de motor como de generador.

Lo que se trata es de en los momentos dónde la demanda energética de la red sea menor por lo que el precio de la energía estará más barato utilizar esa energía para hacer que un ferrocarril movido por los motores síncronos como principal tren motriz suba una pendiente con una carga, carga que se almacenará hasta que sea liberada y la propia gravedad genere la electricidad mediante las mismas máquinas que hemos utilizado para su alzamiento.

Cómo ya hemos visto podríamos decir que existen 3 barreras principales para el desarrollo de nuevas tecnologías de almacenamiento del suministro eléctrico, económica, ya que las opciones son por norma general caras, tecnológicamente las opciones suelen ser ineficientes al compararlas con los estándares existentes o en la práctica simplemente no funcionan como se esperaba de ellas y por último el impacto medioambiental.

Esta tecnología es capaz al igual que las centrales hidráulicas de bombeo de variar demanda y suministro a cada momento acoplándose así a la necesidad de la red eléctrica, además su coste es aproximadamente la mitad que el de las centrales de bombeo siendo incluso capaces de proporcionar energía en unos niveles similares. Además, su implantación no conlleva de un gran impacto medioambiental y puede ser implementado en cualquier terreno montañoso, además de su facilidad de retirada.

Por último, comentar como ventajas que esta tecnología no necesita de ninguna substancia peligrosa o problemática para el medio ambiente, además de su facilidad para la puesta de fuera de servicio, debido a la simplicidad de las infraestructuras requeridas.



Ilustración 10 Visualización de sistema avanzado ferroviario de almacenamiento de energía

Composición del sistema

El corazón de todo este sistema es un vehículo lanzadera, este vehículo es capaz de cargar y descargar con confianza cargas de hasta 50 toneladas por eje con repeticiones diarias de subir y bajar colinas de unos 16 Km y hasta 8.5% de inclinación. Este vehículo ha de tener una gran eficiencia, resultando en una pérdida menor al 10% en cada subida y bajada del sistema, venciendo así las pérdidas energéticas por deslizamiento de las ruedas y de los motores eléctricos.

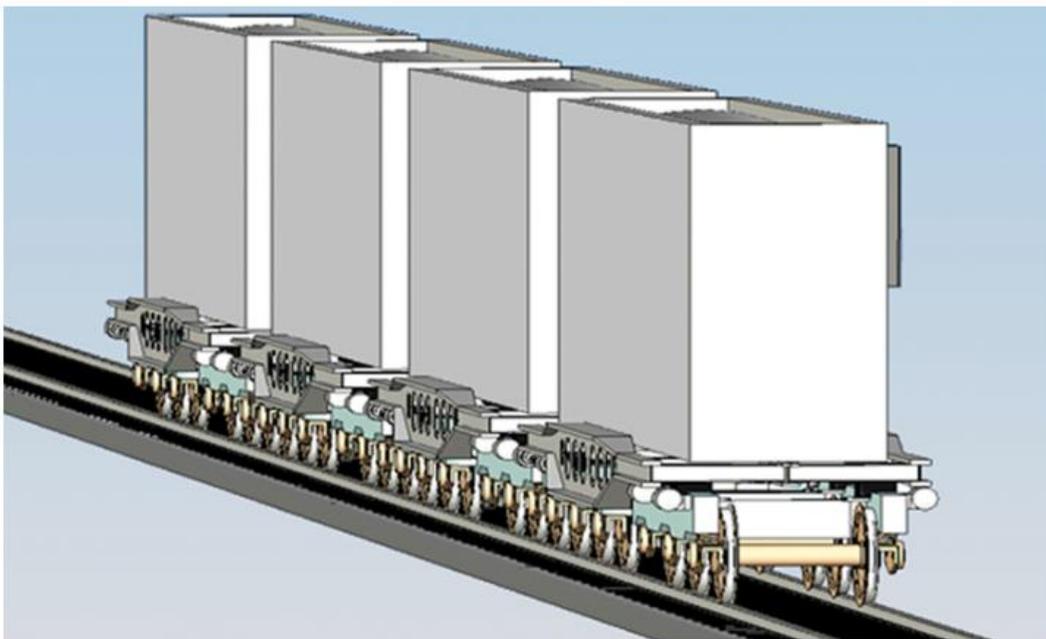


Ilustración 11 Vehículo lanzadera

Estas lanzaderas van situadas al principio y el final del grupo y son alimentadas mediante los raíles, van equipadas con 2 variadores de frecuencia con grupos de inversores IGBT de alto rendimiento, haciendo así que se pueda ajustar la velocidad de la carga enlazando así la frecuencia de generación de la red eléctrica.

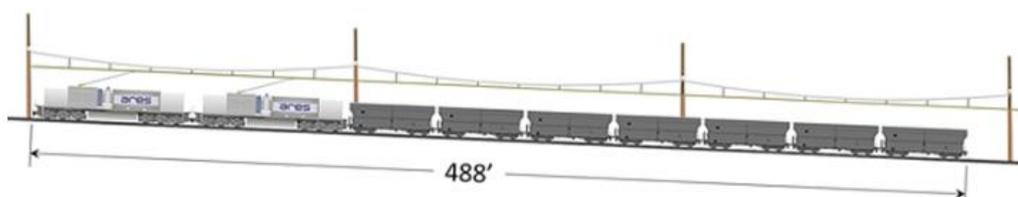


Ilustración 12 2 lanzaderas con 7 vagones de gran tonelaje

Conclusión

Esta tecnología proporciona una alternativa ya lista para funcionar a las centrales hidroeléctricas de bombeo, presentando la opción en ciertas aplicaciones de almacenar energía en grandes cantidades, ya que no son necesarios ningunos avances tecnológicos que logren una resistencia o comportamiento extraordinario. La durabilidad y eficiencia de las vías ferroviarias ha evolucionado durante un siglo consiguiendo así una gran fiabilidad en este sistema, ya que hoy día se utiliza habitualmente y sin problemas.

Otro gran aliciente sería sus distintas posibilidades de operación, pudiendo variar su configuración para así acoplarse a las necesidades de la red eléctrica, además del mínimo impacto medioambiental que produce, tanto en construcción como en operación, a la hora de poner esta tecnología fuera de servicio no deja ninguna huella residual. Tampoco usa agua ni ninguna sustancia peligrosa para el ecosistema, no produce ninguna emisión y al dar de baja el servicio puede ser reutilizado o reciclado enteramente.

También recalcar que, la energía acumulada puede mantenerse ahí durante días, semanas e incluso meses sin degradación, además de que esta estación es capaz de operar en cifras sobre los 40 años simplemente con mantenimientos rutinarios.

Por último, esta tecnología puede ser desplegada rápidamente y con una efectividad económica en cualquier terreno con una topografía aceptable, por lo que podríamos decir que esto representa un significativo avance en el campo de la energía limpia y del almacenaje medioambientalmente responsable de energía y podría ver implementación en los años vinientes.

Almacenamiento electroquímico (Baterías)

La creación de estas es asociada al físico italiano Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta, nacido en Lombardía en 1745. En 1780 se comprobó que con ciertas combinaciones de metales unidos por un músculo animal provocaba en el músculo contracciones, en el experimento de su amigo, Luigi Galvani llamó a este fenómeno “electricidad animal” donde defendía que esta dependía de la fuerza vital que albergaba en el músculo animal, Volta siguió su investigación hasta llegar a la conclusión de que el tejido animal no era necesario para generar tal corriente eléctrica.

En marzo de 1800 Volta escribió a la Royal Society anunciando el descubrimiento de esta pila eléctrica:



Ilustración 13 Pila de Volta

La pila de Volta constaba de discos iguales en tamaño de plata y de zinc, sólo o con estaño, siendo estos separados por un paño humedecido. Conectando el primer y último disco, siendo estos diferentes se hacía fluir electricidad. También descubrió e investigó con el comportamiento de distintos metales, además de que añadiendo NaOH o humedeciendo el paño con agua salada se mejoraba su comportamiento.

En este experimento se podía variar la corriente aumentando o disminuyendo el número de discos, poseyendo así un gran aliciente para su posterior uso y desarrollo.

Más tarde se inventó la célula Daniel, diseñada por John Daniel en 1836, se trataba de una célula formada por un recipiente de cobre en el cual introdujo sulfato de cobre, se introducía entonces recipientes de barro en donde dentro de este recipiente se disponía ácido sulfúrico y una barra de zinc, generando así una corriente continua de 1.1 V, siendo así la primera celda galvánica que generaba una corriente de utilidad.

El siguiente paso lo dio el químico francés Georges Leclanché en 1866, quién propuso utilizar la barra de zinc como electrodo negativo y una barra de carbono como electrodo positivo ambos en una solución de cloruro de amonio.

Conceptos necesarios

Vamos a definir algunos conceptos necesarios para el entendimiento al hablar de baterías.

Empezaremos explicando a que nos referimos al hablar de una batería, una batería es un conjunto de celdas electroquímicas en las que encontramos un electrodo positivo, un electrodo negativo y un electrólito, el cuál puede conducir iones entre ambos electrodos pero que a su vez es un aislante eléctrico. De esta manera se puede almacenar la energía eléctrica mediante reacciones químicas.

Con esta composición mediante una reacción entre los dos electrodos se genera electricidad, para esto debemos conectar primeramente los 2 electrodos, lo cual conseguimos al conectar la parte positiva de nuestra carga al polo positivo de la batería con la negativa, los electrones circulan mediante la conexión realizada y a través de la carga, y los iones positivos circulan mediante el electrólito. Este proceso es realizado en la célula electroquímica, a la hora de la creación de baterías es normal encontrarse distintas celdas o células conectadas tanto en serie como en paralelo, consiguiendo así bien unos valores superiores de tensión o de la capacidad de la batería, al conectar distintas celdas en serie conseguimos aumentar la tensión de nuestra batería, sumando los voltajes de cada célula. Con una conexión en paralelo mantendremos la misma tensión, pero aumentaremos la cantidad de energía que podemos descargar, a estas asociaciones, necesarias para el diseño a nuestro gusto en la actualidad es lo que solemos llamar baterías.

A la hora de hablar de baterías también es necesario diferenciar entre las industriales y las recargables, nombraremos industriales a aquellas que mediante la reacción pueden generar una electricidad, pero no es una reacción reversible, es decir que no podemos invertir la reacción para conseguir el estado inicial de los elementos de la celda, como sí podemos hacer en las recargables al alimentarlas. Estas reacciones electroquímicas son bastante complejas y nos adentraremos en ellas al hablar de cada batería. Las baterías más habituales de este tipo son las de carbono-zinc, alcalinas, dióxido de litio-azufre, disulfuro de litio y hierro entre muchas otras. En este documento solamente hablaremos de las recargables.

Su gran utilización hoy día es debida a factores cómo que pueden ser fabricadas de muchas maneras distintas, acoplándose a las necesidades de su voltaje y corriente según sea necesario, además de su pequeño tamaño el cual nos permite una gran portabilidad, en dispositivos de última tecnología y distintos ámbitos, así como la opción de poder generar esa energía eléctrica de manera instantánea en el momento deseado, estas características respaldan el gran éxito de las baterías. Gracias al uso del Litio hemos conseguido acumuladores con altas energías específicas, altas eficiencias, evitar el mantenimiento de estas y la posibilidad de eliminar los residuos Ion-Litio gracias a la amplia investigación que se ha llevado a cabo con esta tecnología.

Algunos conceptos que son interesantes para entender las características de estas baterías son tratados y definidos a continuación:

- Densidad energética: nos referimos a ella como la cantidad de energía almacenada en relación con el peso del acumulador (Wh/Kg).
- Potencia específica: es la potencia que podemos obtener por cada kg (w/kg), esta potencia se ve afectada por la temperatura y las pérdidas del acumulador.

- Eficiencia carga/descarga: Es la relación entre la energía que inyectamos en el acumulador deseando almacenar, y la cantidad de energía que más tarde podremos extraer de dicho acumulador, actualmente esa eficiencia suele ser cercana al 90 %.
- Ciclos de vida: A la hora de cargar y descargar las baterías debido a las reacciones químicas se va reduciendo la capacidad.
- Velocidad de recarga: es el tiempo que se necesita para recargar la batería, normalmente no se da el tiempo hasta conseguir el 100 % de la carga admisible en el acumulador, sino hasta el 80 % ya que la continua evolución de la tecnología ha obligado a aumentar la potencia de los cargadores pudiendo así disminuir en gran medida estos tiempos de recarga.
- Velocidad de descarga (C-rating): es un término comparativo entre acumuladores ya que se trata de una característica que hace más versátil el acumulador, ya que denota la variación en tiempo y corriente que puede entregar una batería, es decir una batería de 2Ah puede entregar 2A en 1h, 1A durante 2h o 12A en 10 minutos. Aunque esto sea una gran ventaja también presenta un inconveniente, ya que la velocidad a la que la energía es extraída afecta a la cantidad de energía que podemos obtener de ella.
- Profundidad de descarga: capacidad utilizada por la batería antes de su desconexión en un ciclo de uso, esta desconexión se realiza por seguridad para evitar que el nivel mínimo para comenzar la reacción se mantenga.
- Relación de auto descarga: es la medición temporal de cuánto puede una batería ser almacenada y seguir siendo capaz de suministrar una potencia mínima a la vez que son capaces de poder recargarse hasta el valor máximo disponible por la batería.

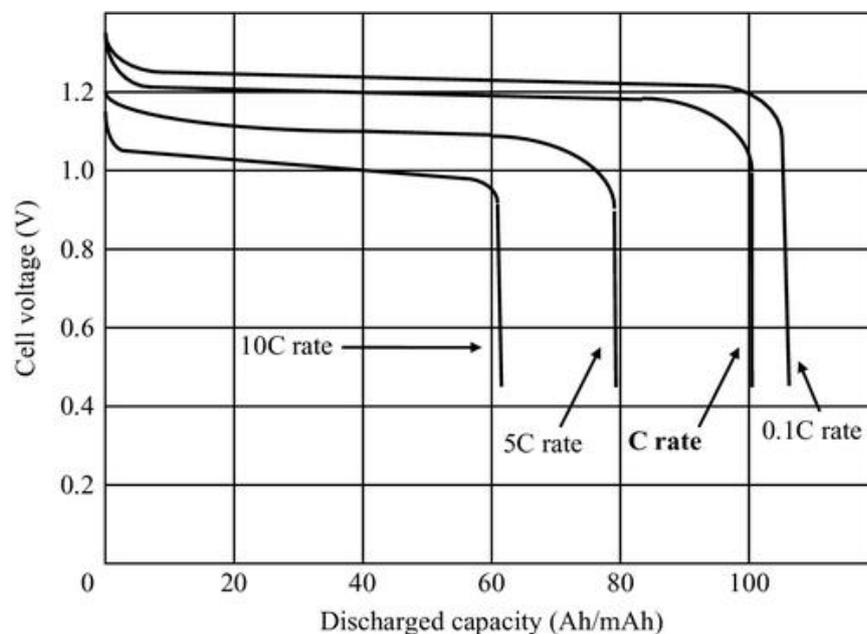


Ilustración 14 Representación de capacidad vs velocidad de descarga

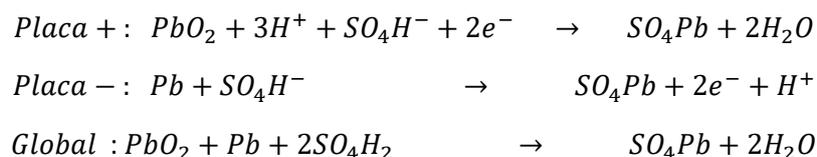
Baterías Plomo-ácido

Estas baterías están formadas por un recipiente en el cual contienen ácido sulfúrico disuelto en agua de una concentración de entre el 30-40%, en el cual insertaremos un conjunto de placas de plomo colocadas de manera alterna según su polaridad positiva o negativa, las placas positivas están cubiertas por dióxido de plomo (PbO_2), mientras que las placas negativas se cubren de plomo esponjoso.



Ilustración 15 Componentes de una batería plomo-ácido

Al tratarse de un acumulador electroquímico como hemos comentado la energía es recuperada y almacenada gracias a una reacción química, la cuál es reversible y dependiendo del momento de carga o descarga generará o consumirá electrones. En este caso la ecuación redox es totalmente reversible por lo que únicamente hablaré de la reacción durante la descarga:



Como indicamos en la reacción global de descarga consumimos ácido sulfúrico a la vez que se genera sulfato de plomo y agua, en la reacción inversa no se llega a regenerar todo el ácido sulfúrico consumido.

Características

Las baterías de plomo-ácido tienen características que las diferencian del resto, tales como su fiabilidad y seguridad todo por un coste muy económico y con una alta potencia específica (180 W/Kg), aunque por contrapartida también podemos decir que tienen un mal comportamiento en temperaturas bajas, que son pesadas, que poseen una baja energía específica (30-42 Wh/Kg) además de una vida útil relativamente corta (500-800 ciclos) junto con una capacidad de descarga pequeña, no solo eso, sino que en caso de ocurrir una sobrecarga pueden llegar a

emitir gases corrosivos o explosivos, añadiendo esto a la toxicidad del plomo hace que deba de ser un acumulador a tratar con alta precaución. A la hora de diseñar la batería según nuestras conveniencias hay distintas posibilidades, el uso mayoritario que se les da a estos acumuladores es en usos dónde una gran corriente debe ser suministrada en un corto periodo de tiempo (C-rating alto). Al utilizar placas muy delgadas se consigue disminuir la resistencia interna del acumulador, permitiendo así circular una gran corriente. Las configuraciones más generalizadas son las de 6 celdas en serie para así conseguir una tensión de 12 V, aunque también existen módulos de 3 células en serie (6V) utilizados por ejemplo en motocicletas.

Hoy día en usos más pequeños estas baterías no son utilizadas, pero en el sector automovilístico y en reservas de emergencia eléctrica de gran envergadura es dónde mayoritariamente se utilizan, podemos decir que en pequeñas y medianas aplicaciones han sido sustituidas, pero a escalas de proyectos muy grandes siguen dominando el mercado mayoritariamente por su gran madurez en el sector.

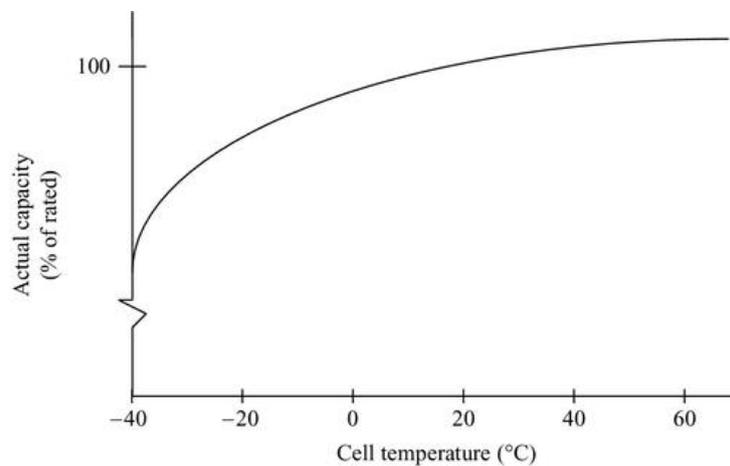


Ilustración 16 Muestra del comportamiento de una batería de ácido-plomo según la temperatura (Capacidad inicial a 23 °C)

La capacidad inicial de las baterías de plomo-ácido es prácticamente siempre inferior a la capacidad estándar del acumulador, aunque durante los primeros momentos de la vida de esta la capacidad disponible aumenta. La cantidad de ciclos de carga y descarga que esta pueda realizar dependerá del régimen de uso que se le dé.

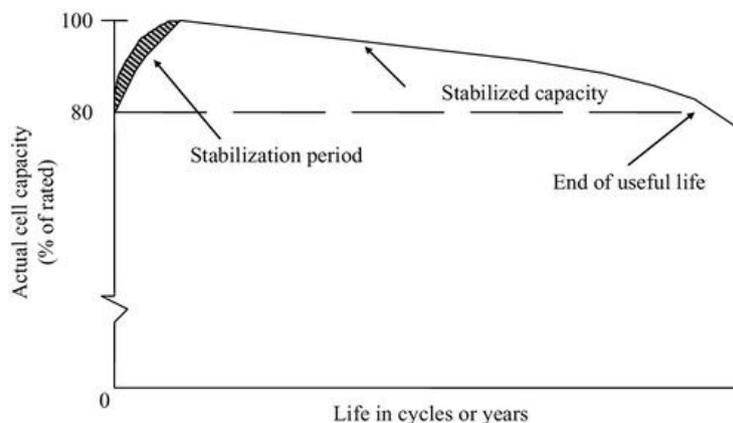


Ilustración 17 Capacidad de una celda durante su vida útil

Baterías de níquel

Las baterías de níquel utilizan un electrodo positivo basado en níquel y una solución alcalina, dentro de este grupo encontramos 5 acumuladores recargables: NiCd, NiMH, Ni-H₂, Ni-Zn, y Ni-Fe. La primera opción que apareció, los acumuladores de níquel-cadmio, se componen de un electrolito de hidróxido potásico (KOH) con una concentración del 22% y se le añade LiOH para mejorar así tanto su vida útil como su rendimiento según la temperatura. Un gran inconveniente se presenta con estos acumuladores debido al impacto medioambiental que producen por culpa de contener cadmio, un material tóxico.

Algunas ventajas que poseen son la capacidad de una recarga bastante rápida, una larga vida útil y de almacenamiento, unas buenas profundidades de descarga y una elevada densidad energética. A la hora de su descarga son capaces de mantener el voltaje relativamente constante hasta que la mayoría de la energía disponible haya sido consumida, momento en el que disminuye bruscamente.

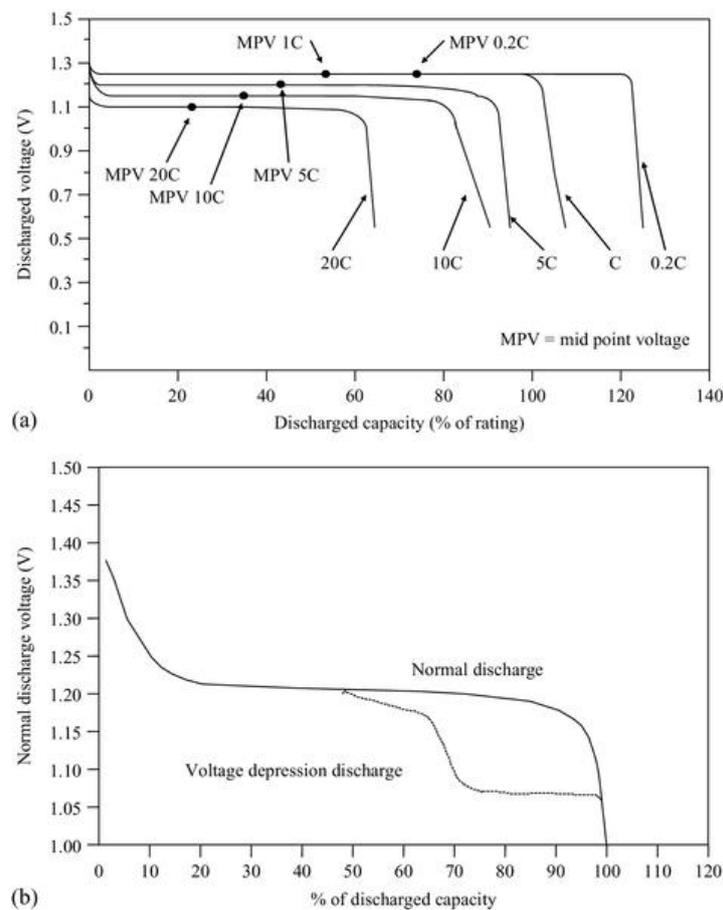


Ilustración 18 a) descarga de NiCd (23 °C) b) efecto de depresión del voltaje

En estas baterías encontramos un efecto peculiar, llamado efecto memoria por la gente, en el cual se cree que la batería es capaz de recordar la cantidad de energía que se le suele demandar, aun siendo inferior a su máxima capacidad, y acaba entregando siempre ese valor inferior, esto es falso, esto se debe al efecto de la depresión del voltaje, el cual suele ocurrir cuando se realizan números descargas parciales del acumulador, haciendo que el voltaje de la célula disminuya por

debajo de 1V antes de consumir el 80 % de su capacidad. Esto puede dar la sensación de que la pila ha muerto, ya que es muy probable que esa reducción del voltaje no cumpla con los requisitos mínimos de tensión del sistema al que pertenece. Este efecto es reversible y desaparece al cargar y descargar totalmente la batería.

Sobre 1990 el desarrollo de los acumuladores de NiCd permitió el avance de estos hacia una alternativa que presentaba hasta un 170% más de densidad energética y con una energía específica de 300Wh/litro frente a los 50-150Wh/litro que se conseguían anteriormente, además de sustituir el componente nocivo medioambientalmente que es el cadmio por una aleación absorbente de hidrógeno en el polo negativo del acumulador.

Aunque no esta tecnología no es superior en todos los aspectos, la vida útil de las baterías de NiMH es menor, de entre 500 y 800 ciclos completos de carga y descarga frente un rango de 500 a 2000 ciclos en las NiCd convencionales, además de un rango de temperaturas de operación más amplio en las NiCd, y en lo referente a la tensión la salida es muy constante durante su uso al igual que con las NiCd, teniendo un voltaje nominal de 1.2V.

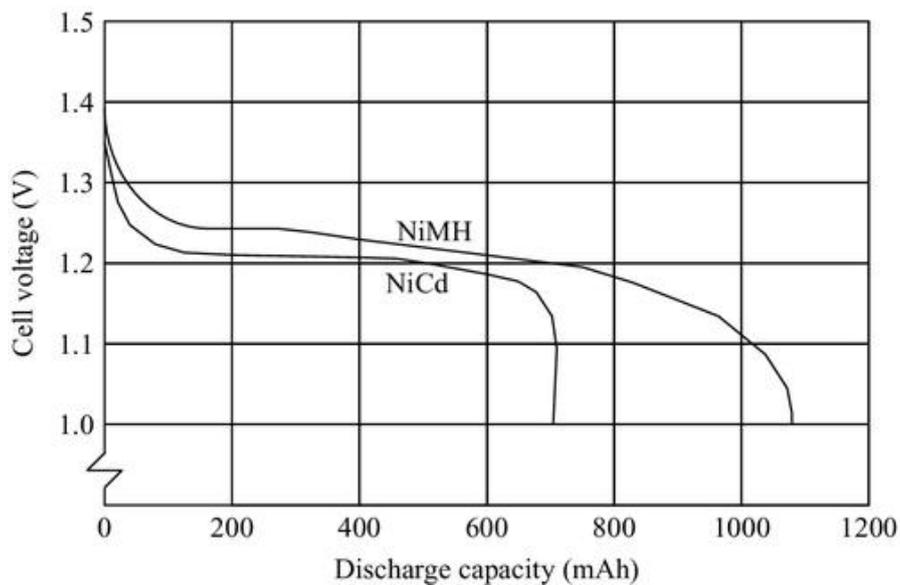


Ilustración 19 Descarga de batería 1100 mAh NiMh y batería 700 mAh NiCd

Es conocido que la sobrecarga de las baterías de NiCd y NiMH es algo negativo para el acumulador, llegando a poder disminuir su propio voltaje en caso de sobrepasar el 100%, esto es debido a que la corriente pasa a generar gas a través del propio material activo, esto también se consiguió reducir en la mejora de las baterías NiMH.

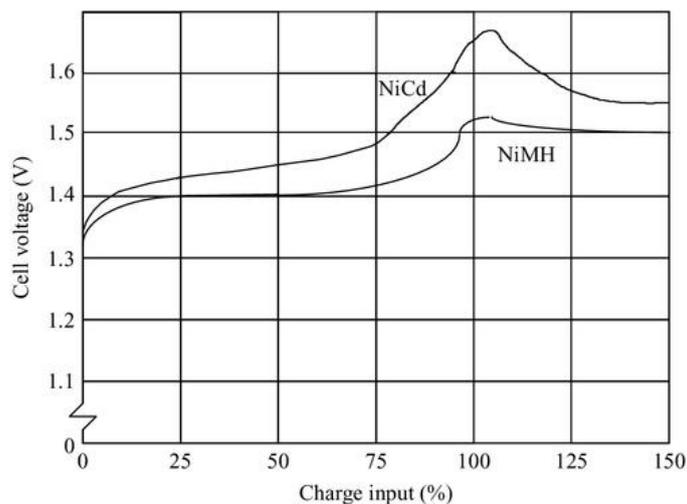


Ilustración 20 Comparación de ciclo de carga de NiCd y NiMH

Baterías de Litio

A finales de 1990 el aumento de la demanda de dispositivos portátiles generó la aparición de las baterías de litio. Estas baterías además mejoraban lo existente, presentando una densidad energética de prácticamente el doble que los acumuladores basados en níquel, pudiendo así conseguir capacidades aceptables con paquetes de mucho menor peso, y no sólo eso, sino que su voltaje es superior por lo que también se necesitará la conexión de menos células para conseguir las características deseadas, volviendo a ahorrar en espacio, además de eso su precio se sigue reduciendo hoy día incluso gracias a el gran aumento de su demanda.

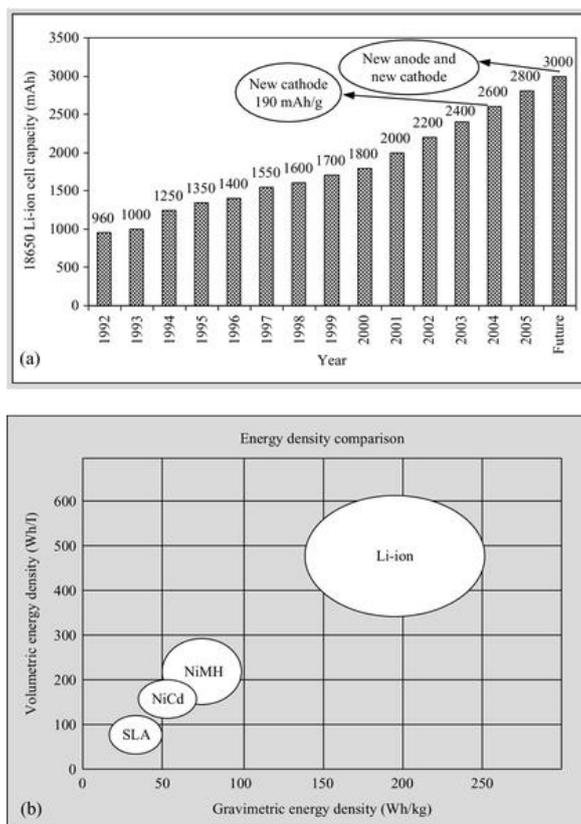


Ilustración 21 Evolución de la capacidad de las celdas de 18650

Ilustración 22 Comparativa Li-ion con otras tecnologías

La primera diferencia notable entre la tecnología basada en níquel y el litio es la impedancia interna más alta de las basadas en litio, normalmente esto significa que posee unas velocidades de descarga más altas, por ejemplo, con un C-rating de 2, la capacidad disponible será menor de la esperada, esto se suele solventar a través de la implementación de líneas en paralelo, reduciendo así su impedancia a la vez que aumentando la capacidad del sistema. Otro problema es la cuestión de la sobrecarga, ya que por la naturaleza de estas baterías no la toleran pudiendo llegar a ocasionar una explosión, de ello que sea necesario de un sistema de control de baterías para su carga el cual controle el voltaje de cada célula individualmente y proyecte sobre cada una la cantidad necesaria solamente.

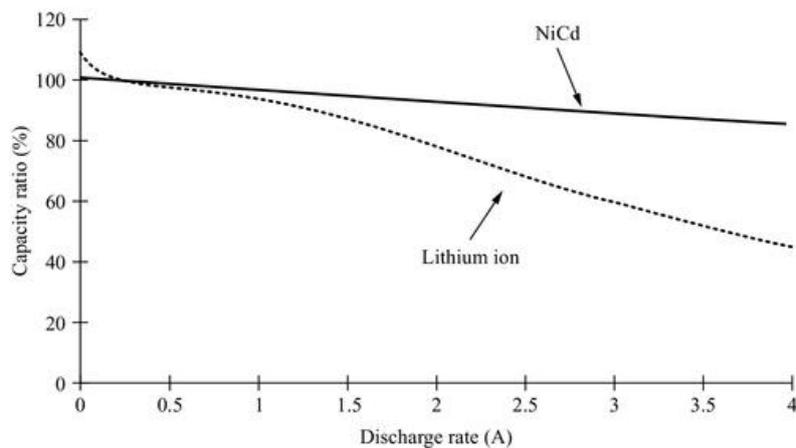


Ilustración 23 Capacidad según C-rating

El ánodo de estas baterías está formado por un material capaz de actuar como depósito reversible de iones de litio, normalmente está hecho de carbono ya sea coque, grafito o carbono pirrolítico. El cátodo es a la misma vez una reserva de iones de litio reversible también, los más utilizados suelen ser LiCoO_2 , LiNiO_2 y LiMn_2O_4 por su alto potencial de oxidación de alrededor de 4 V, consiguiendo así unos voltajes de las células en torno a los 3.6V. Al hablar del electrolito se presenta una clara predominancia de carbonatos orgánicos que contienen sales de litio disueltas en él.

En la tecnología basada en litio nos encontramos con distintas variantes, litio-ion, litio-polímero, litio-metal y litio-metal fosfato. La que hemos descrito anteriormente es litio-ion, la diferencia con las de litio-polímero es que el electrolito líquido es reemplazado por un polímero en estado sólido o de gel, con esto conseguimos que la lata de metal deje de ser necesaria haciendo mucho más fácil empaquetar las células. El empaquetamiento se lleva a cabo mediante un laminado en papel de aluminio y plástico, por lo que además de ocupar menos espacio, ser más maniobrables y pesar menos son más seguras debido a la imposibilidad del derrame ante un pinchazo. Actualmente son las que poseen los valores de potencia y densidad energética más altos dentro de las opciones basadas en litio, además de presentar una mayor eficiencia, un menor peso y una mayor seguridad, pero sus aplicaciones, aunque cada vez se empiecen a ver más, van ligadas a un alto coste y un bajo ciclo de vida. Las baterías de hierro o LiFePO_4 se están produciendo cada vez a una escala mayor debido a que son medioambientalmente benignas, relativamente abundantes sus componentes y no son caros.

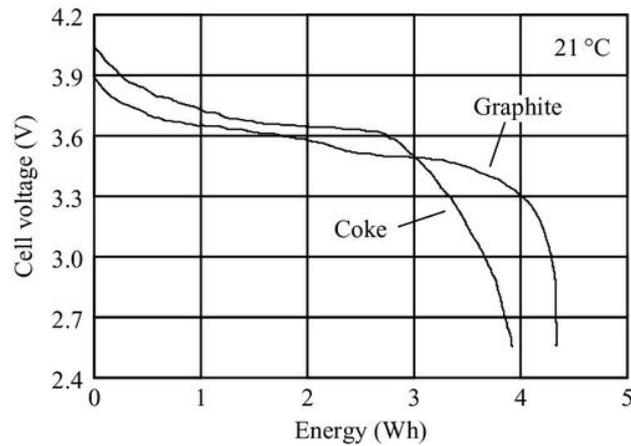


Ilustración 24 Gráfica de descarga de baterías Li-ion según sus electrodos.

Baterías Li-ion (LiCoO₂)

Son las baterías que mayoritariamente se han venido utilizando en cámaras digitales, ordenadores portátiles, teléfonos móviles... La estructura está formada por un electrolito de litio y electrodos en los que se utiliza cobalto, litio y óxido, mientras se suele utilizar el ánodo de grafito. El LiCoO₂ posee una estructura bidimensional, conformado por capas de óxido de cobalto en las que se incrustan los iones de litio.

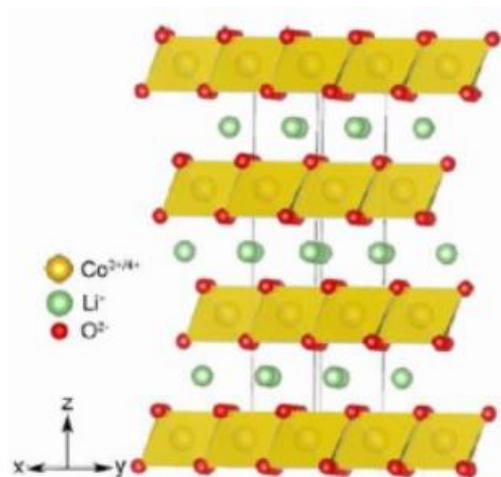
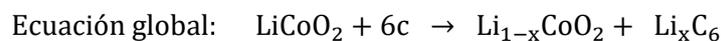
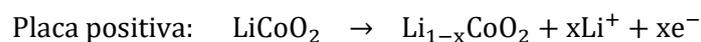
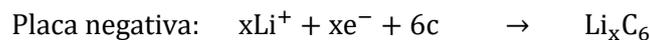


Ilustración 25 Estructura química del LiCoO₂

El proceso químico que se lleva a cabo durante la carga consiste en la reducción electroquímica del electrodo negativo, introduciendo así los iones de litio en la estructura del grafito. Y al revés en el proceso de descarga, produciéndose las siguientes ecuaciones en el proceso de carga:



Baterías Li-ion (LiMn_2O_4)

En lo referente a la estructura de estas baterías comparten el ánodo de grafito que venimos comentando, el cambio viene en la estructura presente en el cátodo, formada por óxido de manganeso y litio, esta estructura proporciona una baja resistencia eléctrica además de que dota a estas baterías de una estabilidad térmica y seguridad mejoradas.

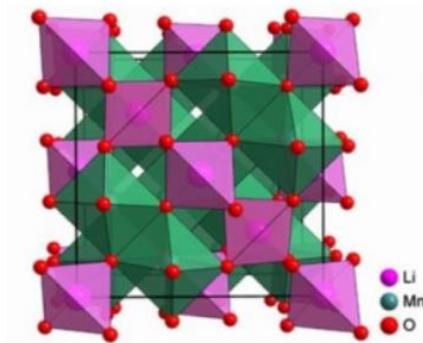
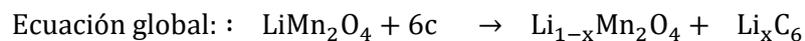
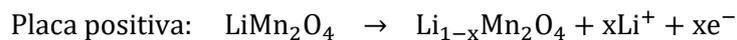
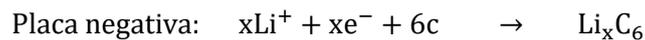


Ilustración 26 Estructura del LiMn_2O_4

Al cargarla los iones de litio abandonan el cátodo para ser incrustados en el ánodo de grafito, sus reacciones en el proceso de carga son:



Baterías LFP (LiFePO_4)

Debido a la estructura de estas baterías conseguimos una resistencia interna inferior, permitiéndonos así conseguir unos ciclos de vida mayores, además al eliminar el cobalto eliminamos un componente altamente peligroso consiguiendo así también una mayor seguridad.

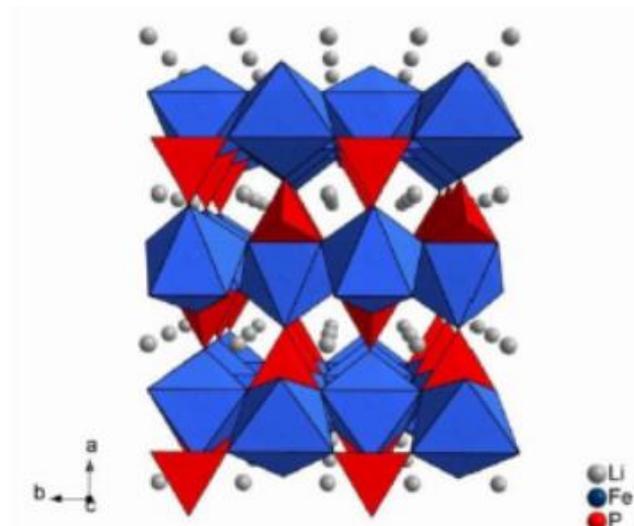


Ilustración 27 Estructura LiFePO_4

Aunque estas baterías nos permitan trabajar con unas velocidades de descarga mucho más altas debido a su menor resistencia, posee una tensión de celda inferior y al tener un coste más elevado y una mayor tasa de autodescarga la hace una difícil competidora en muchos aspectos con el resto de alternativas.

Tabla comparadora de baterías de Li

TIPO	LITIO-COBALTO (LICOO ₂)	LITIO-MANGANESO (LIMN ₂ O ₄)	LITIO-FOSFATO (LIFEPO ₄)	LITIO-POLÍMERO
VOLTAJE	3.6 V	3.8 V	3.30 V	3.70 V
LÍMITE DE CARGA	4.2 V	4.2 V	3.60 V	4.3 V
CICLOS DE VIDA	500-1000	500-1000	1000-2000	>1000
ENERGÍA ESPECÍFICA	150-190 Wh/Kg	100-135 Wh/Kg	90-120 Wh/Kg	130-200 Wh/Kg
TEMPERATURA MÁXIMA	150 °C	250 °C	270 °C	-

Ilustración 28 Tabla de comparación entre baterías de litio

Baterías en desarrollo

Al tratarse de un sector con una demanda tan amplia y creciente se están llevando a cabo investigaciones para encontrar alternativas a las tecnologías ya existentes, a continuación, comentaremos algunas de ellas.

Baterías de estado sólido

Esta batería es uno de los pilares más grandes en desarrollo para las baterías, ya que actualmente el número de investigaciones que se están llevando a cabo para rentabilizar esta tecnología son muy abundantes. Consisten en un electrolito de estado sólido, mientras el cátodo y ánodo principalmente mantienen los propuestos en las baterías de litio, los electrolitos que hemos podido ver utilizados son materiales cristalizados, para el ánodo se ha estudiado el uso de un metal alcalino capaz de evitar la formación de dendritas degeneradoras en el propio ánodo, aumentando así su vida útil, además este tipo de baterías presumen de poseer una alta seguridad, una muy alta densidad energética, una rápida recarga y una muy buena eficiencia térmica además de su bajo coste, debido a la facilidad de trabajar en masa con objetos sólidos en vez de líquidos contaminantes.

Aunque se aprecia un gran futuro para esta tecnología no hay tantos informes presentando opciones debido a que muchas grandes marcas como Toyota, Samsung y algunas más llevan con gran cautela su investigación, dando a denotar la importancia de este desarrollo en un futuro no muy lejano.

Almacenamiento de energía mediante aire comprimido (CAES)

Esta tecnología se podría decir que posee un gran potencial para suministrar grandes cantidades de almacenamiento de energía de alto rendimiento a unos costes relativamente bajos en comparación directa con sus competidores. Como su propio nombre indica, la energía la emplearemos para comprimir aire, pudiendo después obtenerla de vuelta al expandirse este.

Esto no es algo novedoso, debido a que actualmente un porcentaje bastante alto de la energía que es consumida en la red eléctrica ya es utilizado para comprimir aire. Al trabajar con estos sistemas nos damos cuenta de la variación térmica que se produce, observando que al comprimir el aire la temperatura del aire aumenta, de la misma manera que al liberarlo de su recipiente este se enfría, esto habilita muchas disposiciones distintas para estos sistemas, debido a las muchas maneras en las que se puede tratar el calor además de las distintas metodologías para comprimir el aire.

Una ventaja de estos sistemas se basa en que al estar trabajando con una materia que no tiene necesidad de ser almacenada, ya que el aire está en nuestra atmósfera reducimos los costes sustancialmente, tanto en almacenamiento de residuos como en tamaño de la instalación.

El funcionamiento básico de estos sistemas se basa en que, durante las horas valle dónde la energía es más barata utilizar esta para que un compresor que inyecta aire a una elevada presión en un depósito, al realizar esta maniobra la temperatura del aire aumenta, aunque este aire nunca es almacenado caliente, debido a que la masa de aire que se puede almacenar es inversamente proporcional a la temperatura absoluta del aire.

A la hora de liberar el aire almacenado es calentado y se le hace pasar por una turbina donde se expande, cómo hemos dicho antes al extraer la energía del aire este se enfriará.

Todos los sistemas de aire comprimido utilizan una máquina para transformar la energía mecánica en electricidad, siendo estas las máquinas síncronas de las que ya hemos hablado, de la misma manera para los procesos de expansión de gas utilizan la misma maquinaria, pero para realizar la conversión inversa, generando así la energía. Hablamos de que como compresor utilizaríamos las máquinas síncronas como motores, utilizándolas como generadores a la hora de expandir el aire. Esto unido a las altas eficiencias energéticas de las máquinas síncronas facilita que la pérdida de energía sea mínima.

Vamos a hablar de los algunos principios que sigue esta tecnología:

- Si cogemos una cantidad de aire, lo comprimimos para aumentar así la presión a la que está sometido, a continuación, lo enfriamos consiguiendo así que vuelva a su temperatura original, entonces sabemos que el calor total extraído es igual al trabajo neto que se ha invertido en el proceso de compresión. Esto se aplica a gases ideales, por lo que consideraremos que a partir de 200 K el aire se comportará como un gas ideal.

- Cualquier proceso termodinámico es un proceso ideal si se le puede llamar reversible. El calor solamente es transferido hasta cierta diferencia de temperatura, al igual que el flujo del fluido hasta una cierta caída de presión. Por lo que un sistema que no sea diseñado con la mayor reversibilidad posible, será directamente considerado un diseño erróneo. Asumiendo una reversibilidad total para calcular la cantidad de energía eléctrica que podremos extraer simplemente deberemos mirar la cantidad de energía que necesitamos anteriormente para comprimir ese aire.
- Exergía, vamos a utilizar esta expresión para referirnos al trabajo que puede ser extraído de un sistema o cuerpo para permitir que entre nuevamente en equilibrio con su entorno. Así encontramos que un sistema en donde la expansión sea exactamente un proceso contrario al de compresión, con el calor siendo reinyectado en el aire durante su expansión a las mismas presiones y temperaturas a las que se sometió durante la compresión.

Como es obvio, el almacenamiento de aire comprimido se basa en un almacén para el aire a alta presión, esto definirá cuanta energía puede recoger el sistema, también será por lo tanto normalmente el dispositivo más caro del equipamiento. Algo llamativo de estos sistemas es que existen sistemas capaces de explotar fenómenos naturales para desarrollar almacenes de aire presurizado capaces de retener una gran cantidad de energía a costes bajos.

Actualmente se utilizan 2 contenedores de aire comprimido, o bien isocóricos, también llamados isométricos, donde el volumen varía mínimamente al variar la presión, o isobárico, donde la presión permanece constante o bien con variaciones mínimas, ya que el proceso no será isobáricamente perfecto. Estos contenedores suelen estar enterrados bien sea bajo tierra o bajo del agua, ya que en caso de que ocurriera una avería, una gran cantidad de energía sería liberada de golpe en forma de una explosión, pudiendo generar un ambiente muy peligroso a su alrededor, de ahí el uso del escudo natural del entorno evitando así peligros extras.

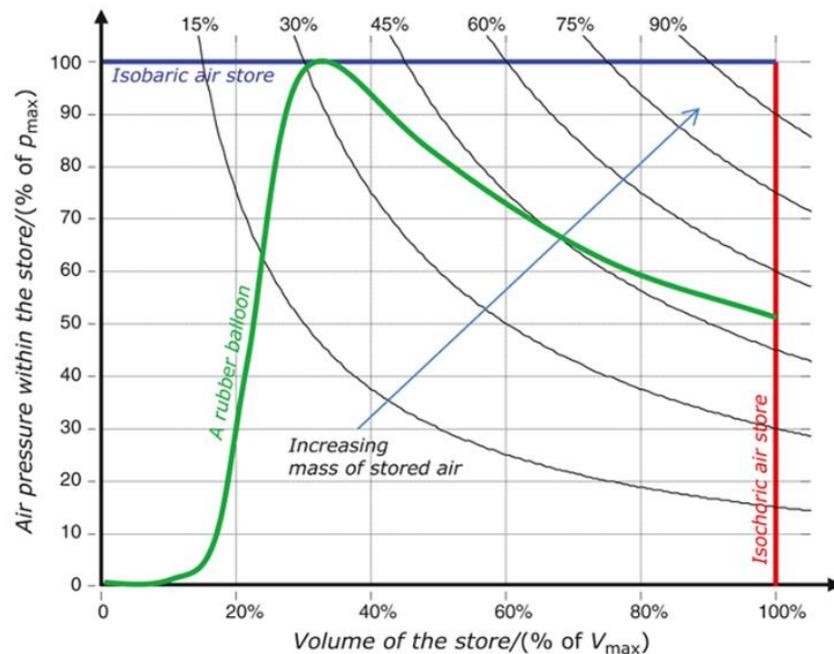


Ilustración 29 Gráfica de contenedores de aire comprimido

Contenedor isobárico

Estos contenedores tienen un beneficio, a la hora de ser diseñados el compresor y el expansor trabajan entre las 2 mismas presiones por lo que puede ser optimizado. Este contenedor suele experimentar en menor medida las variaciones en el estrés dentro del recipiente al trabajar a una presión constante.

La manera más simple de conseguir esto es utilizar un contenedor con un volumen fijo, sellado bajo tierra por ejemplo y dejar pasar líquido que rellene el espacio del aire que ha sido extraído

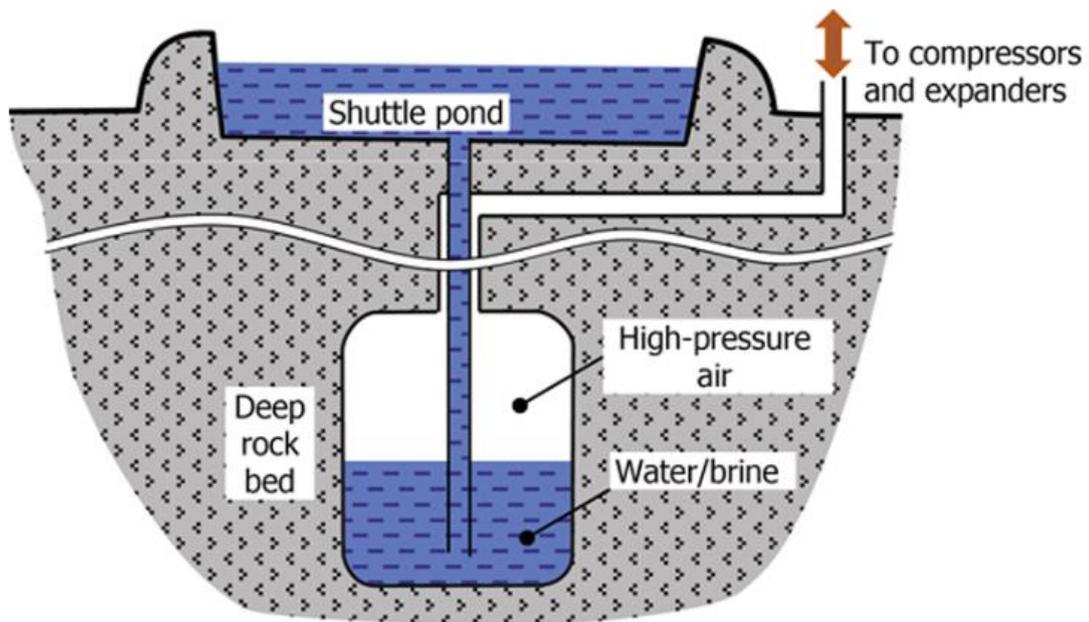


Ilustración 30 Diagrama de contenedor isobárico

Contenedor isocórico

Conceptualmente podríamos decir que estos recipientes son los más sencillos, están formados por uno o más recipientes de volumen fijo unidos por una serie de conductos, estos contenedores diríamos que están llenos cuando la presión a la que están sometidos es la más alta posible y diremos que está vacío cuando llegue a su valor de presión mínima, la relación entre estos estados es normalmente menor que 2, indicando así que en la transición entre lleno y vacío más de la mitad del aire que está presente en el estado de plenitud permanece en el estado vacío.

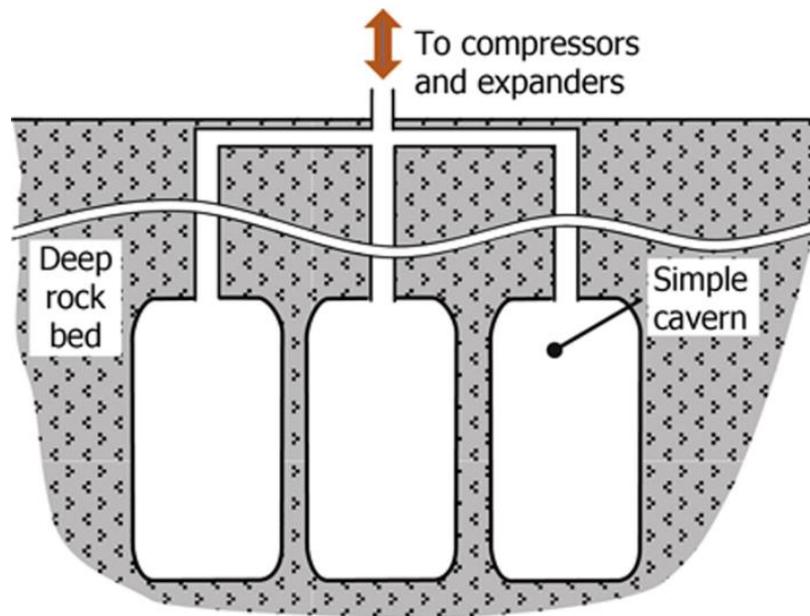


Ilustración 31 Diagrama de contenedor isocórico

Para estos contenedores hace falta tener un especial cuidado, ya que la cantidad de exergía acumulada depende de lo llenos que estén los recipientes, variando así su presión. La temperatura a la que el aire es almacenado se mantendrá constante si el contenedor es vaciado o llenado lentamente.

Por razones económicas y de simplicidad algunas plantas incorporan una válvula reguladora en este tipo de contenedores para reducir la presión hasta un valor constante aceptable para el equipamiento de expansión.

Pressure ratio, r	Exergy (isobaric)/(MJ m ⁻³)	Exergy (isochoric)/(MJ m ⁻³)	Exergy (isochoric throttled)/(MJ m ⁻³)
10	2.333	1.163	0.8248
20	6.071	3.169	2.528
35	12.61	6.737	5.615
50	19.82	10.71	9.106
70	30.13	16.42	14.18
90	41.04	22.49	19.61
115	55.29	30.45	26.77
140	70.10	38.75	34.26
170	88.47	49.06	43.09
200	107.4	59.69	53.28

Ilustración 32 Tabla de comparación

Configuraciones de las plantas

Vamos a hablar de las disposiciones más comunes para este tipo de centrales, refiriéndonos a sistemas diabáticos y adiabáticos, siendo la diferencia entre estos que un sistema adiabático no utiliza ninguna fuente de calor externa mientras los sistemas diabáticos utilizan esta fuente de calor externa para extraer un trabajo extra del aire comprimido almacenado. Si en el apartado anterior tratábamos el dónde y de que manera almacenar esta energía, ahora hablaremos de los distintos procesos para obtener esta energía.

Procesos diabáticos

Las centrales que actualmente utilizan esta tecnología almacenan el aire en cavidades subterráneas para luego extraerlo calentándolo mediante combustible justo antes de su expansión, siguiendo el siguiente esquema. Al calentar el aire antes de su expansión evitamos que pueda cristalizarse dañando la turbina además de ayudar a generar un mayor movimiento en la turbina.

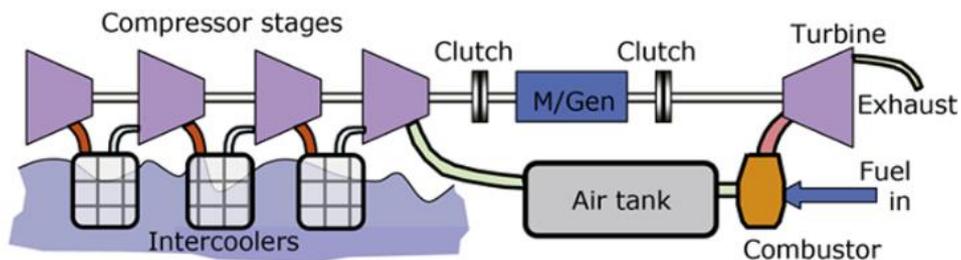


Ilustración 33 Esquema actual de una central

Como podemos ver hay 2 acoples con la máquina síncrona, debido a que ha de poder actuar como motor y cómo generador, esto podríamos evitarlo con 2 máquinas distintas que siempre cumplieran la misma función, pero teniendo varios acoples a la máquina es más barato. En el esquema anterior el aire que sale de la turbina saldrá a una temperatura muy superior a la de ambiente, por lo que se perderá algo de energía, esto se podría solucionar haciendo que ese aire caliente antes de ser liberado ayudara a calentar el aire del tanque, requiriendo así una cantidad menor de combustible para calentar el aire. Además, el proceso de expansión es posible realizarlo varias veces, de esa manera podemos extraer incluso más energía, en el siguiente esquema se muestra lo comentado.

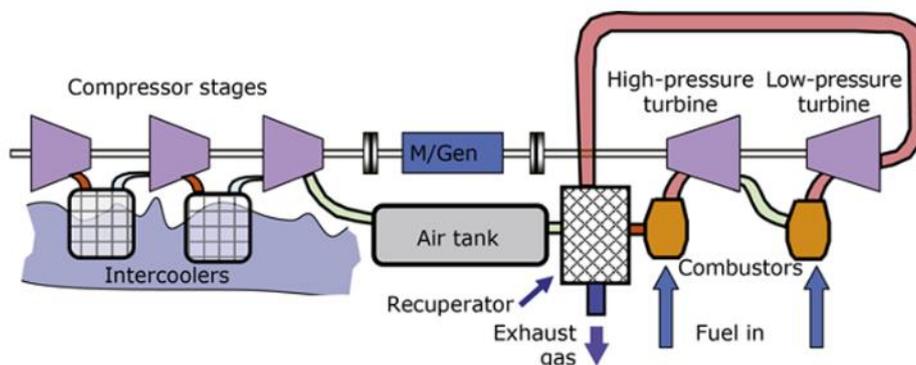


Ilustración 34 Propuesta de mejora del esquema actual

Mediante la repetición de los ciclos de compresión y expansión conseguimos una mayor eficiencia, ya sea a la hora de aumentar o disminuir la presión como podemos ver en la siguiente gráfica

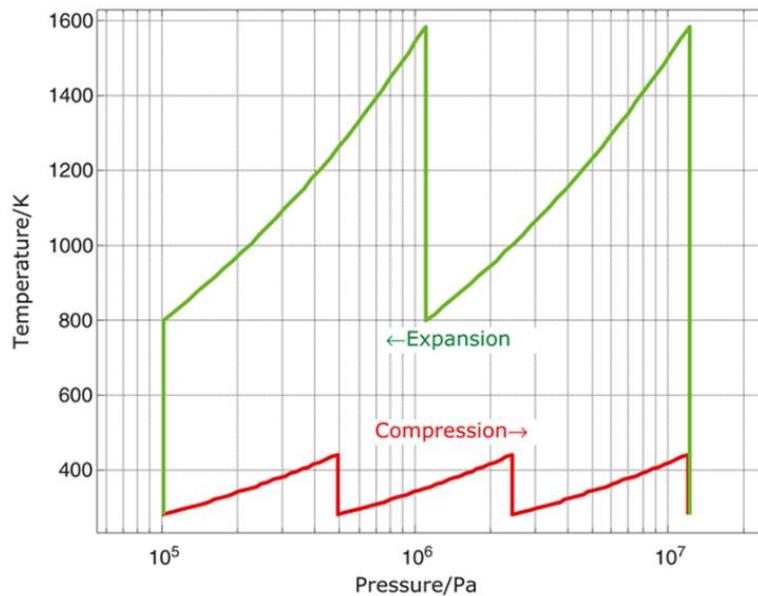


Ilustración 35 Gráfica de repetición de procesos de expansión y compresión

Proceso adiabático

Hablamos de un proceso adiabático al referirnos a un proceso en el cual no se añade una fuente de calor externa, aunque si pueda intercambiarse calor con el entorno.

Un esquema simple que muestra su uso podría ser el siguiente, en el que antes de almacenar el aire se almacena el calor en un recipiente térmico, el mismo que servirá para enfriar el aire al almacenarlo, a la vez que calentándolo antes de su extracción.

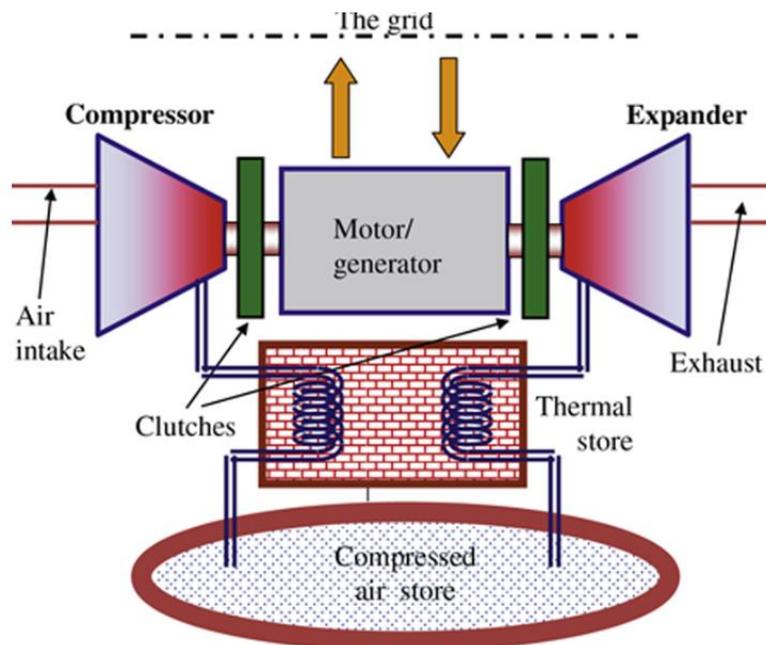


Ilustración 36 Sistema de almacenamiento adiabático

En este caso se trata de un esquema con un solo ciclo de compresión y expansión, para aumentar su eficiencia podríamos aumentar los ciclos, teniendo en cuenta que el acumulador térmico deberá soportar distintas presiones. Por razones en las que buscamos minimizar la destrucción de la exergía al forzar un intercambio de calor entre temperaturas muy dispares podemos decir que una planta adiabática siempre tendrá los mismos ciclos de compresión y expansión.

Una de las ventajas que plantea este mecanismo viene siendo el muy buen rendimiento que puede ofrecer en lugares cómo centros de datos, donde se necesita una gran cantidad de energía eléctrica además de unas temperaturas concretas, ya que durante la etapa de expansión podría ofrecer tanto refrigeración como energía eléctrica. Ayudando así doblemente tanto en el cometido eléctrico como térmico.

Acumuladores de aire comprimido subacuáticos

El entorno marítimo proporciona varias condiciones ideales para el almacenamiento de aire comprimido. Al almacenar aire presurizado en un recipiente subacuático este aire es almacenado a una presión muy similar a la del agua que lo rodea proporcionando así la reacción a la presión del aire comprimido, hemos de tener en cuenta que la presión será distinta, ya que la densidad del agua es menos de la mitad que la de la corteza terrestre exterior. También posee la facilidad de que no es necesario excavar un recipiente, sino que se puede instalar directamente en el lecho marino, además de que existen varias costas con unas profundidades marinas que se pueden encontrar cerca de la costa, ya sea en mares, océanos e incluso en algunos lagos. Es importante conseguir una buena profundidad, ya que mayor será la presión y por lo tanto podremos almacenar más energía, disminuyendo así el coste por unidad energética a medida que descendemos más.

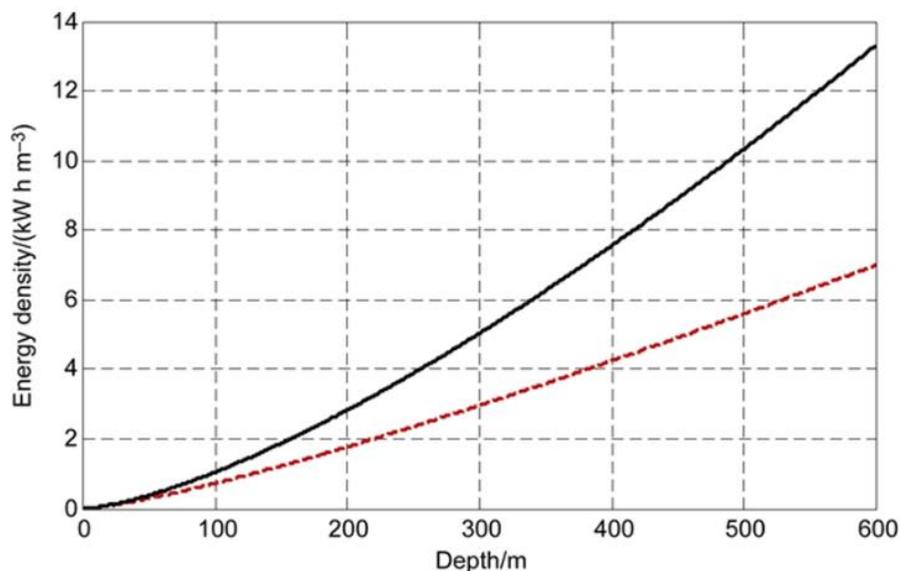


Ilustración 37 expansión adiabática con expansión a temp. Ambiente

Línea roja: expansión isotérmica

Cómo podemos ver, a profundidades pequeñas la densidad energética es pequeña además de que el lecho marino está muy descubierto y se podrían llegar a ocasiona problemas por esto concretamente.

A la hora de hablar del contenedor podemos encontrar distintas soluciones, ya sean flexibles o rígidos. Los recipientes flexibles están hechos de un tejido revestido que funciona como barrera aire/agua atados a una base en el lecho marino para evitar así la flotabilidad. Este peso muerto debe evitar el uso de materiales como el cemento o los metales, por lo que la opción de utilizar arena o rocas aparece como una opción muy a tener en cuenta y económica. A este peso muerto se le pueden anclar más de un contenedor de aire, generando así un fácil despliegue.



Ilustración 38 Recipiente flexible de diámetro 1.8 m diseñado en la Universidad de Nottingham (2011)

El coste de los recipientes flexibles es inferior en comparación directa a uno rígido, aunque en otros ámbitos como en la durabilidad el resultado es contrario. Además, los recipientes rígidos pueden ser pensados directamente con un lastre que se encargue de que el recipiente se mantendrá en el lecho marino sin necesidad de conexiones ni construcciones extras, otro beneficio que pueden tener sería el almacenamiento del calor que se consigue en la etapa de compresión, ya que los recipientes rígidos perderían el calor a un ritmo inferior debido al mayor aislamiento ofrecido por sus paredes.



Ilustración 39 Almacenes rígidos de roca seca con lastres en Lago Ontario

En cualquiera de estas plantas la localización de la maquinaria de conversión y del almacén de energía térmica depende de la distancia entre los recipientes y la orilla, y de los costes que podrían tener la transmisión de electricidad mediante una línea y aire a alta presión mediante conductos, aunque para ciertas localizaciones en las que podamos obtener una profundidad aceptable y cercana a la costa es más rentable colocar las instalaciones en la propia orilla, evitando así la necesidad de suministrar de manera subacuática electricidad y consiguiendo una facilidad a la hora de la accesibilidad a la maquinaria, ofreciendo así un mantenimiento sin complejidad alguna.

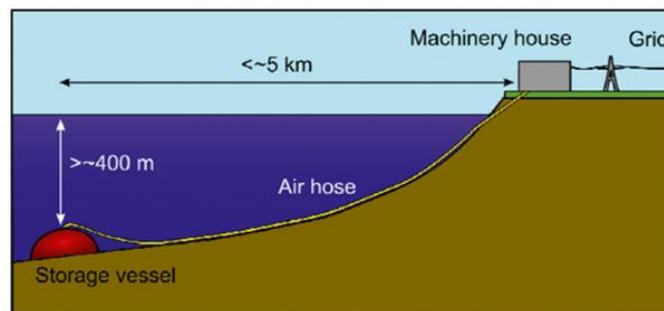


Ilustración 40 Esquema propuesto anteriormente

Cómo podemos ver esta tecnología nos ofrece distintas configuraciones dependiendo de los resultados e incluso del terreno que nos sea más provechoso, esta gran variedad y el alto rendimiento que se puede conseguir podrían habilitar este tipo de sistemas en un futuro, con una gran dispersión una vez fueran competitivos.

Almacenamiento mediante aire en estado líquido

Nos referimos a una tecnología que utiliza aire licuado o nitrógeno como medio de almacenamiento. Cualquier sistema típico actúa en 3 etapas, en la primera se utiliza la energía de las horas valle para limpiar, comprimir y licuar el aire, en la 2ª etapa almacenaremos el aire que hemos tratado en un tanque aislado a 196 °C y una presión aproximada a la ambiental, en la última etapa se procede a la descarga, donde se recupera la energía mediante el bombeo, recalentamiento y expansión. Como hemos visto anteriormente, la energía térmica utilizada para comprimir y expandir el aire puede ser almacenada aumentando así el rendimiento de la instalación. Esta tecnología como más tarde veremos es principalmente interesante como una cohesión a otros procesos.

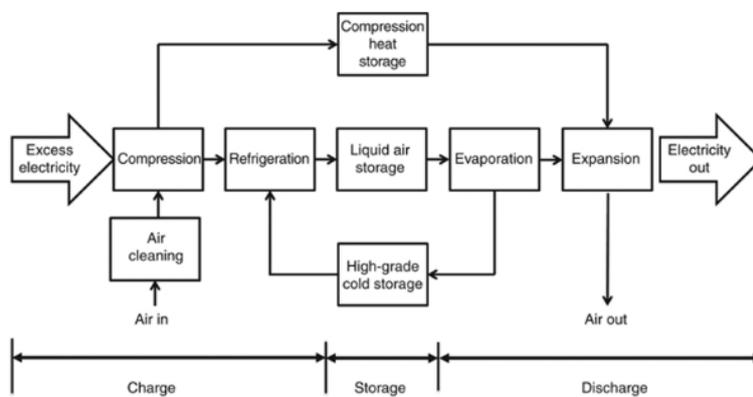


Ilustración 41 Esquema de almacenamiento en estado líquido

Este concepto para almacenar energía surgió en la Universidad de Newcastle en 1977, aunque el trabajo allí realizado implicaba principalmente análisis teóricos, los cuales llevaron al posterior desarrollo por la empresa Mitsubishi Heavy Industries. El trabajo realizado por esta empresa fue una planta de 2,6 MW con el licuado de aire y los procesos de recuperación de energía operando independientemente. Otra alternativa que surgió por la empresa japonesa Hitachi proponía que estos procesos de recuperación de energía y licuado del aire fueran llevados a cabo por un regenerador, el cual almacena energía del frío obtenido durante la etapa de generación energética y utiliza esta energía en el proceso de licuado. Como era de esperar, este segundo método mostró tener una eficiencia superior.

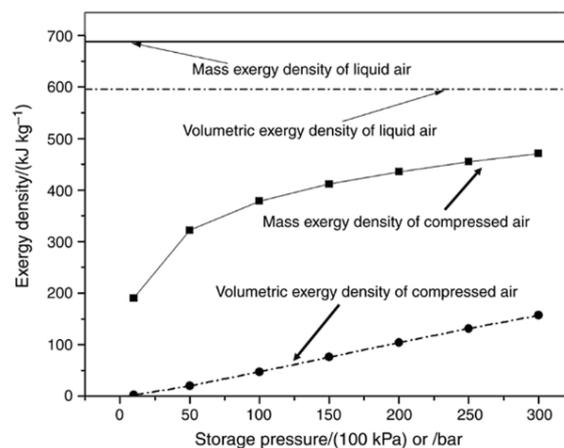


Ilustración 42 Comparación de exergía en función de la presión

Funcionamiento

Al asumir que el calor específico de un material se mantendrá constante al variar su temperatura de la ambiente producirá una carga o descarga de energía térmica en el material.

$$\delta Q = C_p \Delta T$$

$$dE = dH - T_a \cdot dS = dH - T_a \cdot \frac{\delta Q}{T}$$

Para calcular la exergía del material, siendo dH el cambio de entalpía y dS el cambio de entropía. Al integrar de T_a a $(T_a + \Delta T)$ obtenemos:

$$\Delta E = C_p \left[\Delta T - T_a \cdot \ln \left(\frac{T_a + \Delta T}{T_a} \right) \right]$$

$$\eta = \frac{\Delta E}{|\Delta Q|} = \frac{\Delta T - T_a \cdot \ln \left(\frac{T_a + \Delta T}{T_a} \right)}{|\Delta T|}$$

En la última ecuación, como combinación de el cálculo de incremento de la exergía disponible y la cantidad de energía térmica podemos obtener el porcentaje de energía disponible almacenada en un material.

Existe el almacenamiento en frío o en calor, siendo bastante más eficiente el almacenamiento en frío, esto es debido a que el aumento de la entropía está ligado al aumento de temperatura.

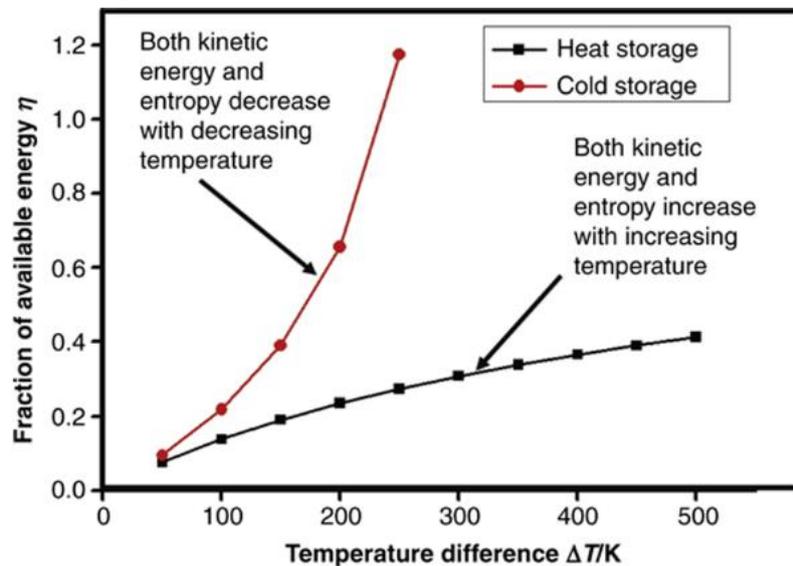


Ilustración 43 Comparación en función de temperatura ($T_a=25^\circ C$)

Implementación

Esta tecnología puede servir para mejorar el rendimiento de otros procesos ya existentes, como por ejemplo en plantas nucleares, en plantas solares térmicas y algunos sistemas más, esto es debido a su función casi directa como fuente de calor, pudiendo así ser aprovechadas por este método gracias a varios intercambiadores de calor.

En el ejemplo de las plantas solares térmicas se utiliza un suministro exterior de aire o nitrógeno licuado, en este esquema no se opera con una planta de licuado, por lo que requiere de la existencia de una planta de licuado a gran escala relativamente cerca en la localización. El sistema propuesto consiste de 3 fases de expansión del líquido generadoras, en las que mediante intercambiadores de calor calentamos el fluido antes de su expansión usando la energía obtenida por los captadores solares, además de enfriar así el fluido que acumula el calor solar también generando en el sistema una eficiencia mayor.

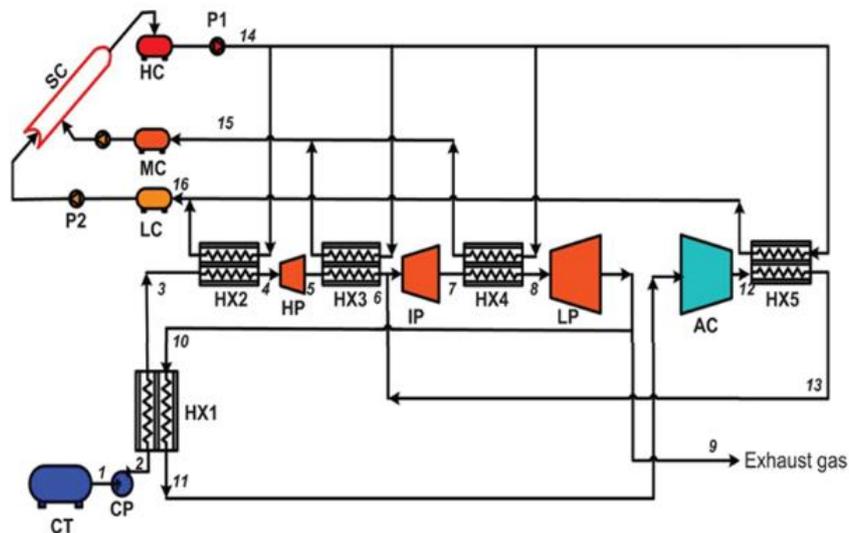


Ilustración 44 Esquema de implementación en una planta solar térmica

Los resultados del sistema muestran que se consigue una eficiencia del 30% extra que colocando las 2 plantas por separado.

Otra posible implementación es en las centrales nucleares, añadiendo un sistema de almacenamiento de aire en estado líquido por completo, es decir un sistema de licuado además del generador. Esto puede llegar a generar un gran beneficio debido al actual comportamiento de las centrales nucleares, las cuales para cuadrar la demanda energética y suministrar en horas valle suelen actuar por debajo de su potencial energético, cabe decir que esto ocurre porque las instalaciones generadoras cubren con creces la demanda base, pero ese uso de una central nuclear es perjudicial para la esperanza de vida y la seguridad de esta misma, por lo que a continuación propondremos un sistema que aproveche el actual desuso que sufren este tipo de centrales. La central nuclear tendría el mismo esquema que siempre con la única diferencia que en el ciclo secundario por dónde circula el fluido hasta los generadores existiría una válvula de triple salida, habilitando así una salida extra para que así el fluido no solamente pueda ir a las

turbinas, sino que también pueda actuar cómo calentador del aire a alta presión del sistema de almacenamiento líquido, este sistema consta de una planta de licuado de aire y de una de extracción de energía. En el siguiente diagrama podremos ver la combinación de ambos.

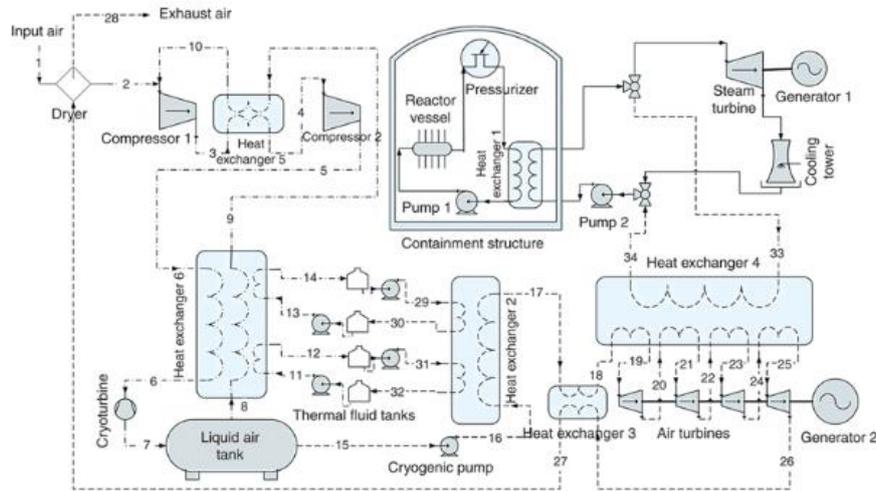


Ilustración 45 Diagrama de combinación

En los tanques de fluidos térmicos se encuentra una combinación de metano y etanol, ya que de esta manera se pueden cubrir tanto los rangos de trabajo de la temperatura en el momento de precalentado cómo conseguir que tal fluido actúe como almacén en frío. Para ello se propone una combinación de 2 tanques para cada uno de los fluidos, durante el proceso de almacenamiento de frío los fluidos son bombeados desde el tanque caliente al tanque frío y al revés en el momento de suministrar la energía, pudiendo suministrar calor para el momento anterior a la expansión o frío para el fluido que está a punto de ser almacenado. Esta implementación puede simplificar el diseño ya que no es necesaria la adición de intercambiadores de calor externos, además de que la temperatura deseada puede ser ajustada fácilmente controlando el flujo de los fluidos.

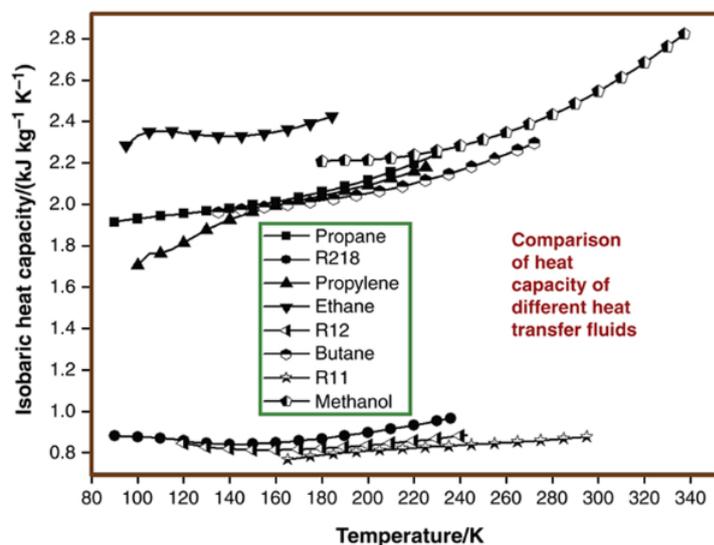


Ilustración 46 Comparación de distintos fluidos

Cómo podemos ver, en el sistema encontramos una turbina criogénica, de esta manera el fluido se expande de una manera casi isoentrópica disminuyendo así la temperatura y la entalpía por lo que consigue una mayor producción de líquido a la vez que consigue una mayor potencia en el eje.

Este sistema tiene distintas propuestas operacionales:

- Modo de almacenamiento de energía: durante las horas en las que la demanda es inferior a la energía que puede suministrar la planta, en vez de reducir el suministro el exceso de energía generado servirá para hacer funcionar el sistema de licuado de aire.
- Modo de suministro total: en las horas pico, donde la demanda es superior a la potencia de la planta se pondría en marcha el sistema de aire líquido, obteniendo así un suministro adicional.
- Modo convencional: cuando la demanda está equilibrada con la producción en ese caso el sistema de aire líquido podría ser apagado totalmente, tanto la planta de licuado como la generadora.

Este sistema también puede ser integrado en las plantas de gas natural licuado al hacer uso del frío gastado en el proceso de licuado. El frío que se pierde en los terminales de importación es bastante grande debido a los grandes almacenamientos de gas natural licuado, además para calentar y así pasar a estado gaseoso nuevamente se utiliza normalmente agua del mar y se quema algo de gas natural, perdiendo así tanto el frío almacenado como la energía del gas quemado. Este proceso sería sustituido por el almacenamiento de aire en estado líquido, cambiando el agua marina por aire, haciendo que el aire frío sirva directamente como alimentación para el proceso de licuado del aire, consiguiendo así un ahorro energético bastante grande.

Volantes de energía cinética (flywheels)

Esta tecnología se basa en una masa rotativa la cual almacena energía cinética, a la hora de cargarse se aplica un par motor en la dirección de rotación de la masa acelerando así el rotor, aumentando su velocidad y con ello la energía almacenada. A la hora de la descarga es, al contrario, se aplica un par motor contrario al rotor el cual va frenando su rotación y extrayendo la energía gracias a la utilización de un motor síncrono que pueda actuar como generador.

Funcionamiento

El modelo del que hablamos se encuentra cerrado en un recipiente aislado y al vacío para así poder disminuir su resistencia aerodinámica en el rotor, este rotor está conectado directamente en el eje a un generador síncrono, habilitando así el poder funcionar tanto como motor como generador. La energía cinética del objeto rotatorio viene dada por su momento de inercia.

$$E = \frac{1}{2} I \omega^2$$

Dónde I es el momento de inercia del rotor que escojamos, ya que se pueden utilizar distintas formas para esta parte, estas distintas formas han sido estudiadas para poder comparar las

eficiencias según se elija, llegando a la conclusión de que los cilindros tanto huecos como macizos es lo más eficiente.

$$I = \frac{1}{2}mr^2$$

Este sería el momento de inercia de un disco o cilindro macizo en donde la m sería la masa y r el radio, en caso de ser hueco sería el doble. La velocidad máxima de giro es limitada por la fuerza del material del rotor. La tensión a la que se va a someter el rotor debe permanecer inferior a la fuerza del material del rotor y con unos márgenes de seguridad para evitar su rotura.

$$\sigma_{\max} = \frac{1}{8}\rho r^2 \omega^2 (3 + \nu)$$

Esta sería la tensión máxima que podría aguantar un disco o cilindro macizo, donde ρ es la densidad del material y ν es el coeficiente de Poisson del material del rotor. En el caso de ser un cilindro hueco la tensión máxima vendría dada por:

$$\sigma_{\theta} = \rho r^2 \omega^2$$

La velocidad del volante es obtenida al multiplicar su velocidad angular por su radio, una vez podemos obtener la velocidad del volante podemos calcular la energía por unidad de masa disponible.

$$\frac{E}{m} = KV^2$$

La K es un factor de dimensionado el cual tomará de valor 0.25 para un disco o cilindro macizo y 0.5 para un cilindro hueco.

Esta tecnología siempre busca que esta velocidad sea la mayor posible, esto depende directamente del material, ya que cómo podemos ver la energía almacenada va ligada directamente a la velocidad, de ahí el presente interés, hoy día existen materiales compuestos de carbono de alto rendimiento los cuales pueden llegar a soportar velocidades de entre 500 y 1000 m/s, ya que los volantes de alto rendimiento de acero oscilan a unas velocidades entre 200 y 400 m/s, normalmente a los volantes de acero se les da una forma maciza mientras que a las fibras de vidrio o de carbono se opta por utilizar la forma de cilindro hueco. Esto implica directamente que debido al uso de estos materiales la durabilidad del sistema sea muy alta, llegando a vidas útiles de 10^6 ciclos de carga y descarga.

Componentes

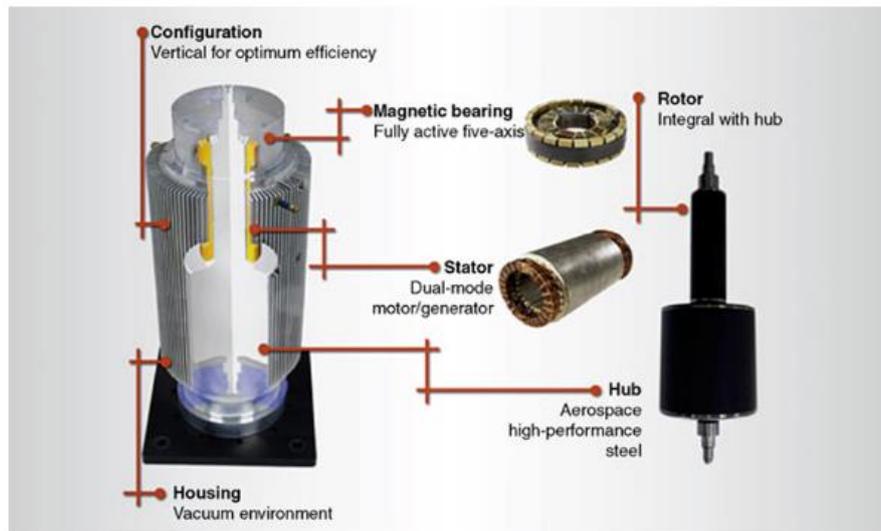


Ilustración 47 Configuración del volante

Otro de los elementos principales a la hora de hablar de la vida útil de estos dispositivos son los cojinetes, los cojinetes soportan el rotor mientras le permiten girar libremente. Estos cojinetes son mucho más grandes debido al mayor tamaño y peso del rotor, esto hace que tengan un rendimiento algo peor y una vida útil menor que los típicos cojinetes de bolas menor tamaño. Otro problema que se presenta es el control de temperatura y la lubricación, ya que al trabajar sin aire o a una presión muy baja esto se complica.

Los dos tipos de cojinetes que actualmente se utilizan son o bien cojinetes magnéticos o bien cojinetes de bolas, los magnéticos hacen levitar el rotor mediante campos magnéticos de manera que el desgaste de estos es prácticamente nulo, además de permitirnos posicionar el rotor de una manera activa gracias a la posibilidad de controlar estos campos. La opción simple, barata y más común son los cojinetes de bolas, aunque el problema de la dificultad para prever su vida útil es significativo. Otra solución es el uso conjunto de ambos tipos, utilizando por ejemplo imanes permanentes reducimos el peso que los cojinetes de bolas han de soportar, permitiéndonos utilizar bolas más pequeñas las cuales tendrán un mayor rendimiento y una mayor vida útil.

Actualidad

Las aplicaciones de esta tecnología son viables cuando se cumplen ciertas condiciones, tales como que represente una tecnología con un coste adecuado para competir así con otras formas de almacenamiento de energía o que exista un mercado dónde poder desplegarlo y que por lo tanto exista un retorno económico. Actualmente uno de sus usos es cómo regulador de frecuencia de la red eléctrica ya que todos los generadores deben funcionar a una frecuencia muy cercana y casi constante común a todos ellos, en caso de que la carga crezca más rápidamente de lo que los generadores pueden responder el generador reducirá su velocidad

disminuyendo con el la frecuencia, pudiendo producirse un desacople del sistema generando así una caída del sistema.

Esta tecnología es idónea para auxiliar el mantenimiento de la red, ya que los volantes son capaces de variar su velocidad en cuestión de milisegundos además de poder mantener una velocidad constante, ya que esto es lo que exige la red para poder contrarrestar en cada preciso momento de la manera más efectiva.



Ilustración 48 Planta de regulación de red mediante volantes (20 MW)

Una capacidad más que interesante es que se puede almacenar energía a un ritmo constante y se nos permite liberarla de una manera muy rápida, produciéndose una descarga repentina. Esto puede tener una gran utilidad en ciertos ámbitos, un ejemplo podría ser la lanzadera de jets de un portaviones militar, en esta descarga mediante un diseño concreto de la lanzadera se libera una potencia de 81.6 MW en un ciclo de entre 2 y 3 segundos. Otro ejemplo podría ser en la lanzadera de una Montaña rusa, nuevamente teniendo un gran pico en el inicio, en este caso hablamos de una descarga de 8MW en 2 segundos.

También pueden tener un uso como propuesta de seguridad, actuando como acumuladores y en caso de que hubiera una caída de la red eléctrica estos actuaran como generadores dando tiempo hasta que los equipos de alimentación de diésel estuvieran operativos. En este ámbito compete directamente con las baterías, con la ventaja de una vida útil bastante más alta y evitando el problema de tener que recambiar y reciclar las baterías.

Otro uso es en la incorporación en vehículos móviles, como autobuses, automóviles o incluso en aeronaves. En la competición automovilística se ha demostrado que tienen un gran potencial, por ejemplo, en el campeonato de resistencia de LeMans series se utiliza con un gran resultado debido a la posibilidad de mejorar el rendimiento gracias a la cohesión al motor principal reduciendo así el número de paradas técnicas necesarias durante la carrera de 24 h.

Lo que podemos sacar en claro es que la viabilidad para su implementación es directamente competitiva con otras tecnologías, las cuales para ciclos cortos de vida ya poseen un precio inferior a la alternativa de los volantes de inercia y pueden seguir disminuyendo en precio, mientras que los materiales de los que se fabrican los volantes están muy desarrollados por lo que es difícil ver una sustancial caída en sus precios, por lo que a no ser que se desarrollen nuevos materiales para la fabricación del rotor y se posibilite el aumento de energía por unidad de masa no debería poder competir económicamente con otras alternativas, donde retoman el

sentido es para aplicaciones con esperanzas de vida de décadas, además en los ámbitos en los que se utiliza está lejos de desaparecer siendo una gran alternativa para trabajos de muy corta duración y con largas esperanzas de vida.

Acumuladores de energía térmica

A la hora de almacenar energía térmica hay que diferenciar entre 2 maneras de retener la energía, la química se basa en la ruptura y creación de enlaces químicos mediante reacciones reversibles con cambios muy bruscos en la entalpía, el calor que deseamos almacenar lleva a cabo la reacción generando así productos con una alta energía, mientras que en la descarga el proceso se realiza al contrario liberando el calor. La física es la que engloba el almacenamiento mediante calor latente y sensible, para un material la cantidad de energía que puede almacenar depende del rango de temperaturas en el que se puede calentar y la masa, de manera que:

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} mc_p dT,$$

En donde C_p es el calor específico del material a una presión constante, m la masa y T_1 y T_2 la temperatura inicial y final correspondientemente.

Por lo que podemos ver el calor almacenado está ligado directamente con el rango de temperaturas del material y con su masa. Materiales densos como el cemento o la roca son capaces de almacenar una gran cantidad de calor. En un rango pequeño de temperaturas los materiales de calor latente pueden incluso funcionar mejor que los materiales de almacenamiento mediante calor sensible. Estos materiales almacenan el calor latente que se genera en la transición de fase del material, nos referiremos a ellos como PCMs (phase change materials). Cuando estos materiales son calentados hasta la temperatura de transición este cambia de fase, se trata de un proceso isotérmico y requiere de una adición de energía, esta adición de energía es la transición del cambio de entalpía o calor latente, si el cambio de fase es reversible esta energía será devuelta al enfriar el material, además todo el calor añadido para elevar la temperatura del material, tanto antes como después del cambio de fase se puede almacenar en forma de calor sensible. Por lo que se consigue un almacenamiento de calor sensible hasta cierta temperatura, en la cual se almacena energía gracias al cambio de fase del material manteniendo su temperatura.

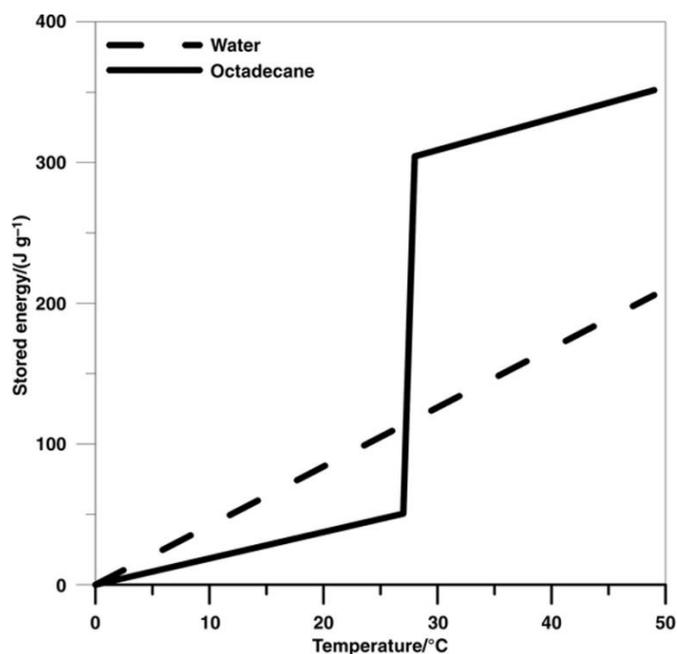


Ilustración 49 Comparación PCM y agua

En principio se puede utilizar cualquier cambio de fase al utilizar PCMs, pero sólido-líquido es la transición más utilizada, ya que tanto la transición sólido-gas como líquido-gas poseen una gran entalpía de transición (>300 J/g), habilitando el almacenamiento de grandes cantidades de energía, también producen un gran cambio en el volumen del material, siendo esto un problema que actualmente las hace inutilizables. También es viable las reacciones sólido-sólido ya que no se produce un cambio de volumen ni de firmeza por lo que son muy fáciles de almacenar, aunque tienen un cambio de entalpía bastante inferior (<100 J/g) por lo que al final las transiciones sólido-líquido son las más estudiadas y aplicadas, estas poseen un cambio de entalpía de unos 200 J/g y su cambio de volumen no es demasiado relevante ($<10\%$), siendo estos los valores más competitivos.

A la hora de seleccionar el PCM que deseemos utilizar hemos de tener en cuenta distintos factores, el primero y más importante es la temperatura de transición, ya que en caso de elegir un material con una temperatura de transición fuera de nuestro rango útil de temperaturas no se llegará a producir el cambio de fase almacenando solamente calor sensible. Lo siguiente que hemos de mirar es el calor latente que el material tiene, ya que nos habilita a poder almacenar una mayor cantidad de energía, en el caso de tener un espacio delimitado la expansión producida durante el cambio de fase también puede ser algo a tener en cuenta, también deberemos tener en cuenta la conductividad térmica del material ya que puede llevar a un excesivo tiempo de carga y descarga del material, el coste y su estabilidad, para así poder realizar diseños con una vida útil alta sabiendo que con el paso del tiempo no reacciona con el aire, con el moho o que su estructura no se va a degradar a medida que se siga utilizando, la estabilidad también es el algo crucial ya que los ciclos de carga y descarga dependen directamente también del material, aunque la fundición o cristalización no debería de afectar al material.

Una característica negativa de estos materiales es el llamado sobre enfriamiento o supersaturación, se refiere a la persistencia de la fase de alta temperatura por debajo de su temperatura de transición, por debajo de esta temperatura la fase de alta temperatura es

estable, pero puede llegar a sobre enfriarse por 100 K o más antes de realizar la transición a la fase estable. Si el sistema se sobre enfría por debajo de la temperatura mínima diseñada, el calor latente que se había almacenado no será reutilizado, actuando así simplemente como un contenedor de calor sensible.

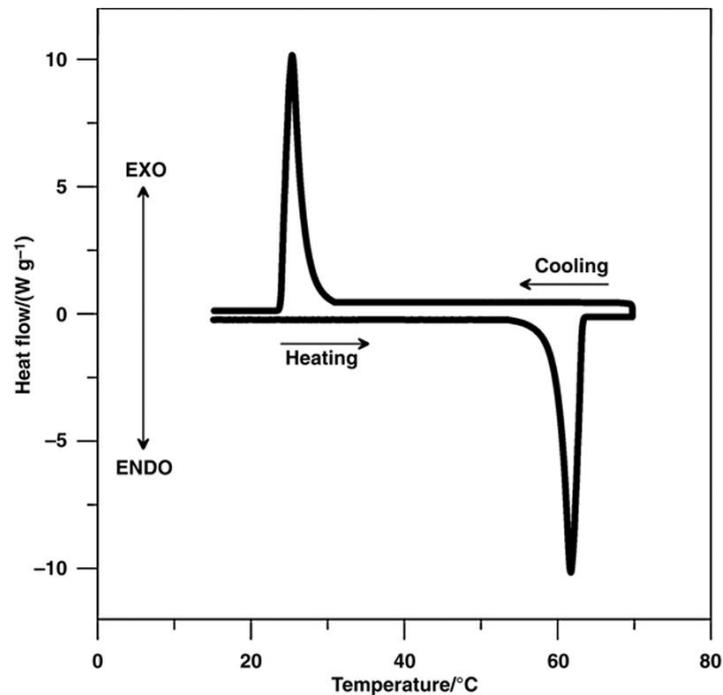


Ilustración 50 Gráfica de sobre enfriamiento

El PCM además ha de ser compatible con su contenedor, ya que no debe corroer, degradar o disolver/ablandar el material que lo va a contener. El contenedor ha de ser capaz de almacenar el líquido una vez realizada la transición sin que haya fugas además de poder acomodar el cambio de volumen asociado con la expansión térmica del PCM. En el referente del coste, encontrar un material con una excelente conductividad térmica y estabilidad con un coste reducido es muy difícil o casi imposible, habilitando este sistema en momentos y aplicaciones muy concretas, o bien provocando el uso de sistemas que ayuden a mejorar la conductividad térmica, por ejemplo.

Intercambiadores de calor

Una gran variedad está disponible para estos sistemas de almacenamiento, aunque básicamente se pueden clasificar en tres variedades: bobinas sumergidas, intercambiadores de calor externo y de tipo manto.

Las bobinas se suelen situar al fondo de los tanques de almacenamiento ya que es dónde la temperatura es más elevada y por lo tanto conseguiremos una mayor diferencia, los intercambiadores externos presenta la opción más flexible para estos acumuladores ya que con su bajo coste habilitan el uso de tanques normalizados, por último los intercambiadores de

manto consisten un acumulador de 2 paredes que permite que el fluido de transmisión de calor circule entre ambas, estos sistemas suelen necesitar una gran superficie de intercambio y de tanques especializados que pueden aumentar el precio, pero consiguen un gran rendimiento.

Transmisión de calor en sistemas basados en PCMs

La transmisión del calor es uno de los aspectos mayores para los PCM y sus sistemas de almacenamiento, tanto al cargarse (PCM derritiéndose) cómo al descargarse (PCM solidificándose).

Cuando añadimos energía, mediante una fuente de calor que puede ser por ejemplo un fluido de transmisión de calor circulando por unas tuberías, a un PCM totalmente sólido el calor se transmite por conducción, produciendo así que las primeras capas en contacto con la fuente de calor empiecen a derretirse, una vez que el PCM se ha derretido el método de transmisión de calor cambia de conducción a convección natural, provocando así que el PCM líquido más caliente suba, derritiendo la parte superior más rápidamente, a partir de aquí la convección natural hace que el resto de PCM se acabe derritiendo. Las diferencias de temperatura mayores entre la fuente de calor y el PCM provocan un almacenamiento de energía más rápido y que el PCM se derrita antes, consiguiendo así unas relaciones de almacenamiento de energía mejores, esto también lo podemos conseguir aumentando el flujo del fluido de transmisión que circula por las tuberías.

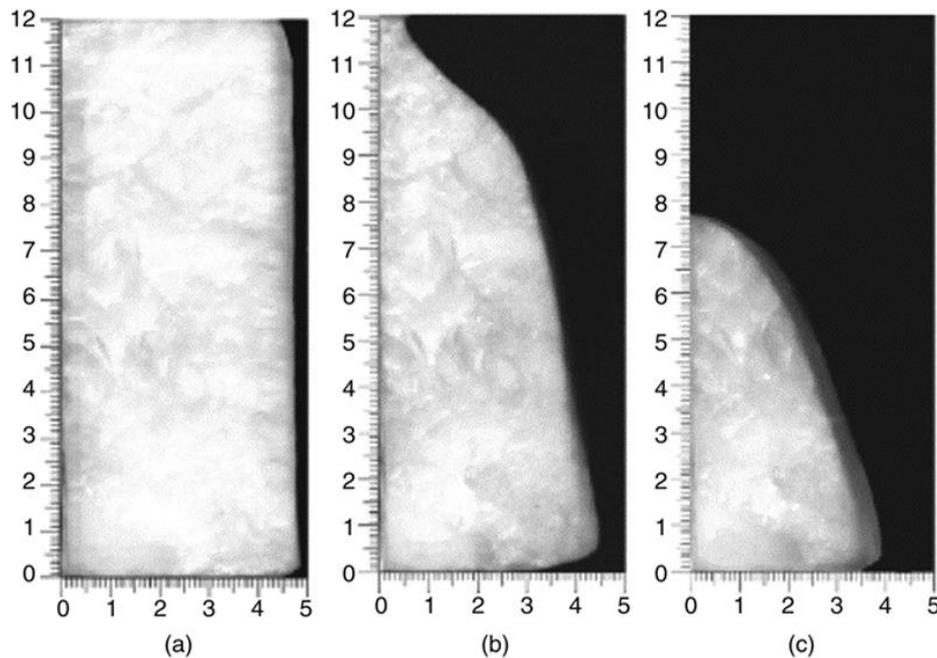


Ilustración 51 Ácido láurico (dodecanoico) siendo derretido desde la derecha a 60 °C

Cuando el PCM se encuentra por completo en estado líquido y la energía calorífica se retira mediante una fuente de frío, por ejemplo, la circulación de un fluido de transmisión de calor circulando por unas tuberías, las primeras capas del PCM que contactan la parte exterior se enfrían y empiezan a solidificarse, cabe recalcar que esta temperatura de solidificación puede ser distintas que en la que se derrite debido al sobre enfriamiento. El proceso de solidificación se realiza totalmente mediante conducción y por lo tanto suele ser más lento que cuando se

derrite. El PCM se solidifica en capas consecutivas, aumentando así el grosor solidificado y aumentando también la resistencia térmica entre la fuente de frío y el PCM aun en estado líquido. Cambiar el flujo no tiene un gran efecto en la relación de extracción de energía.

El mayor problema térmico presente en los acumuladores de PCM se puede clasificar de un problema de tasa, el cual dice que la teórica cantidad de energía que puede ser almacenada puede ser calculada directamente gracias al volumen del sistema y las propiedades del PCM, pero las tasas de almacenamiento o descarga para estos materiales suele ser baja, debido a su inherente reducida conductividad térmica, ya que también importa el tiempo necesario para cada proceso. Distintos métodos son utilizados para aumentar esta tasa precisamente, la mayoría de estas soluciones son geométricas, añadiendo aletas a los laterales del PCM y adaptando la forma de la encapsulación aumentando el área superficial en contacto con el PCM aumentando así la transferencia de calor. Otra opción es utilizar un intercambiador de calor explícitamente diseñado para mejorar las tasas de transferencia de calor.

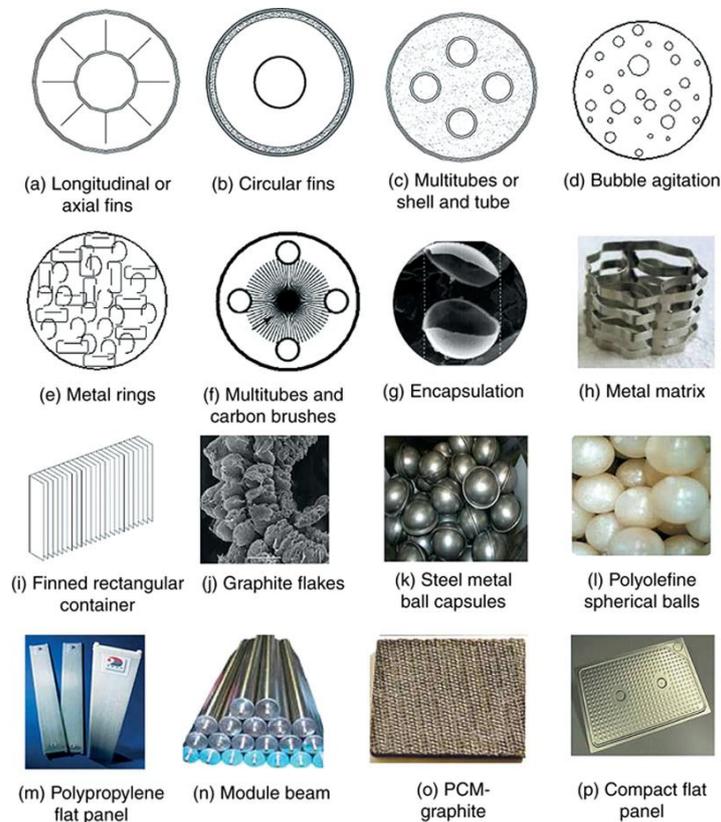


Ilustración 52 Distintas posibilidades para mejorar la transferencia de calor

Teóricamente existe un método de trabajo en el que se disponga tanto de una fuente de frío como de una fuente caliente, produciendo una carga y descarga simultanea del sistema, en este ámbito la investigación realizada es muy poca por lo que no nos meteremos en profundidad.

PCMs a temperatura subambiente

Actualmente se suelen utilizar PCMs para aplicaciones de refrigeración, debido a que algunos pueden tener una temperatura de transición por debajo de la temperatura ambiente, sobre todos estos materiales el hielo es el más barato y familiar con el uso. Con su alto calor latente de fusión (334 J/g) unos 11 Kg de hielo equivalen a 1 Kw a 0 °C, durante mucho tiempo, durante el invierno se ha recogiendo hielo o nieve y se ha almacenado en construcciones térmicamente aisladas o en agujeros subterráneos para así poder enfriar cualquier cosa más tarde durante mucho tiempo. Este concepto de enfriar mediante el almacenamiento de energía térmica está cogiendo más y más fuerza cada vez, edificios como el Burj Khalifa en los Emiratos Árabes Unidos, el Google Data Center en Taiwán, el Rockefeller Center e incluso el enfriamiento de distritos enteros y no solamente edificios, como en el distrito Minato Mirai 21 la construcción de la Yokohama Landmark Tower, la cual suministra frío a todo el distrito.

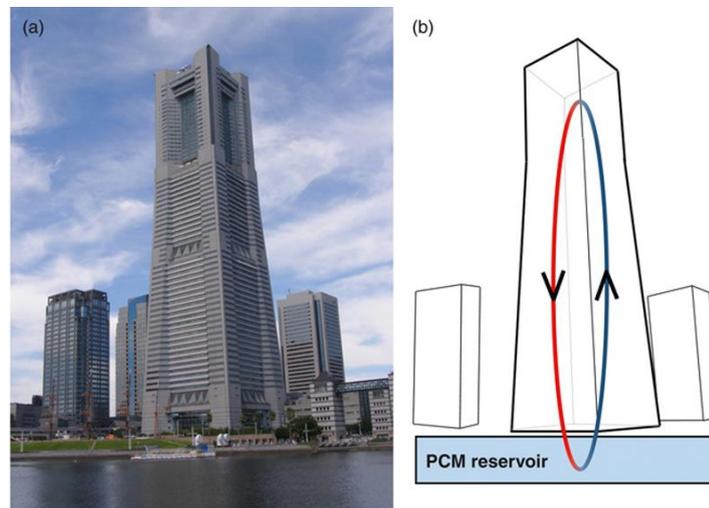


Ilustración 53 Yokohama Landmark Tower b) Simplificación del sistema de enfriamiento

PCMs a temperatura ambiente

Los PCMs con una temperatura de transición muy cercana a la temperatura ambiente (21-28) °C son muy usados para adecuar la temperatura del espacio habitado reduciendo las fluctuaciones que la temperatura puede realizar. Este efecto de balanceo se consigue mediante la absorción del exceso de calor generado entre el espacio y el acumulador a la temperatura de derretimiento del PCM, esta energía es más tarde soltada cuando se llega al punto de solidificación del PCM, es decir, cuando la temperatura disminuye. Habilitando así un rango de temperaturas para el espacio menos brusco y más estable.

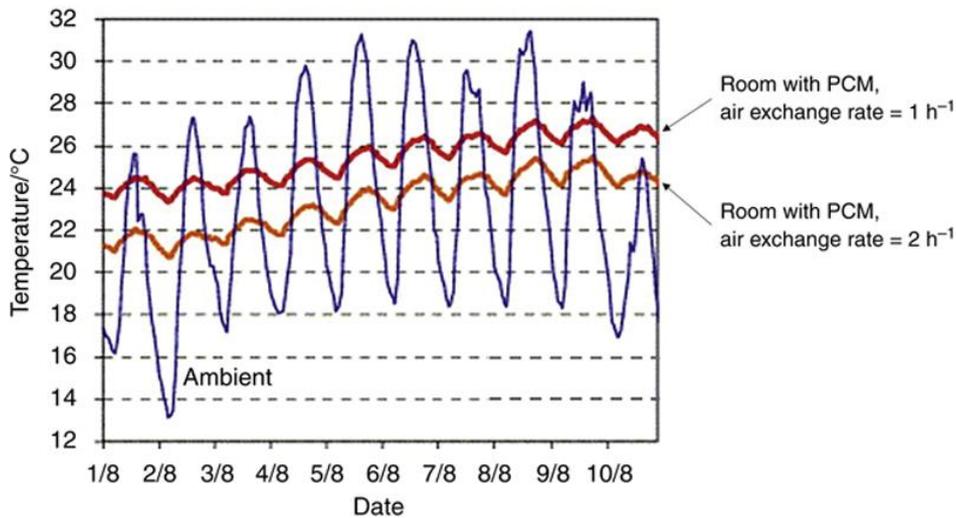


Ilustración 54 Efecto de regulación mediante PCM en agosto durante 8 días en Ljubljana (Slovenia)

Actualmente hay varios PCMs que se han estudiado en distintos climas y productos comerciales para poder implementar en la construcción del producto, pudiendo controlar de una manera mucho más eficiente su temperatura gracias a los PCMs sin un mantenimiento y proporcionando una estabilidad térmica.

PCMs en un rango de temperatura moderado

Muchos PCMs, como los hidratos de sal hidratados, tienen su temperatura de transición en un rango de temperatura moderada (40-100) °C. Los hidratos de sal consisten de una sal, orgánica o inorgánica, estas sales suelen tener una densidad alta de almacenamiento, haciéndolos muy atractivos desde ese punto de vista, aunque presentan otros desafíos.

El primer problema al que nos enfrentamos es que algunos hidratos de estas sales se funden de manera incongruente, otro problema es que la parte menos hidratada normalmente no se fundirá en el rango de temperaturas deseado y será más densa que la solución formada con el agua de la deshidratación, además esta diferencia de densidades provocará una separación dentro del propio depósito, almacenando las sales más densas en el fondo del contenedor, existen varias maneras de solucionar este último problema, mediante agitación mecánica del contenedor o añadiendo agentes que nos permitan aumentar la viscosidad evitando así la segregación hacia el fondo del contenedor.

Otra dificultad es la tendencia que tienen estos materiales a sobre enfriarse, a la hora de cristalizarse necesita de un núcleo cristalizado de un radio crítico en el material, incluso aunque se formen varios núcleos de cristales hasta que uno no sea lo suficientemente grande no se llevará a cabo la cristalización del material. Esto puede ser arreglado de distintas maneras, añadiendo agentes que ayuden a formar el núcleo o utilizando la llamada técnica "Cold Finger", la cual mantiene un enfriamiento en un área localizada en la cual el núcleo crítico puede formarse más fácilmente.

Por último, en su estado fundido son soluciones salinas acuosas por lo que acaban siendo corrosivas para una gran cantidad de metales, complicando así su almacenamiento, por esto la selección del material del recipiente debe ser estudiado con sumo cuidado.

Los PCMs con un rango de temperatura moderado tienen varias utilidades. El almacenamiento de grandes periodos o estacional, en el que se almacena el calor durante varios meses, incluso durante años, esto es posible gracias a 2 mecanismos principales, el sobre enfriamiento estable, una propiedad que solamente el almacenamiento mediante PCMs posee. El aislamiento reduce el rango de pérdidas de calor de la masa relativa a la capacidad del acumulador. El aislamiento en almacenes pequeños puede ser muy efectivo, aunque costoso, mientras que es más sencillo aislar contenedores más grandes. Tanto los contenedores enterrados como semienterrados presentan una gran eficacia a la hora de aislar grandes contenedores de calor.

Los PCMs estables al sobre enfriamiento son materiales que rápidamente pueden sobre enfriarse y permanecer así a una temperatura ambiente por duraciones de estaciones enteras, materiales como algunos hidratos de sal o alcoholes de azúcar poseen esta propiedad. En la práctica el almacenamiento está limitado por el volumen del PCM y el grado de sobre enfriamiento, el cual es la diferencia entre la temperatura de transición y la temperatura ambiente.

Como consecuencia de este sobre enfriamiento estos PCMs requieren un mecanismo de activación para llevar a cabo la liberación de energía al ser demandada, muelles de compresión u otros materiales pretensados pueden servir como mecanismo de activación, otros métodos como pueden ser vibraciones ultrasónicas o campos eléctricos parecen funcionar, aunque no se ha demostrado que de manera fiable pueda iniciar el proceso de solidificación en muchos PCMs.

El calor desprendido la solidificación inicial de un PCM sobre enfriado eleva su temperatura hasta su correspondiente estado de equilibrio entre las 2 fases. El grado de sobre enfriamiento afecta a la cantidad de energía retenida, y por lo tanto su eficiencia.

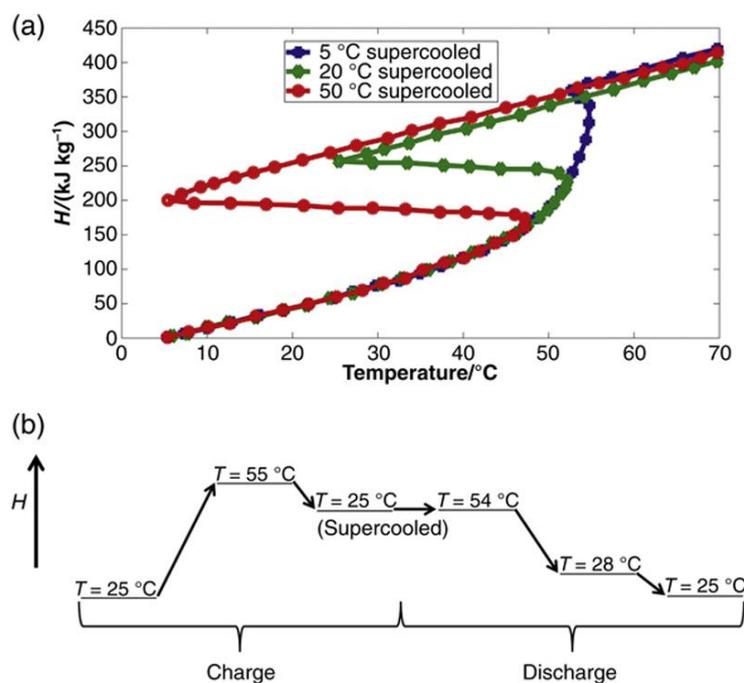


Ilustración 55 Perfil entalpía-temperatura de $\text{NaCH}_3\text{COO} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ diluido incluyendo sobre enfriamiento y solidificación

Ilustración 56 Perfil de entalpía relativa para un ciclo completo de $\text{NaCH}_3\text{COO} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ diluido

PCMs a altas temperaturas

Para el almacenamiento de calor a altas temperaturas se trabajan con rangos de varios cientos a temperaturas que sobrepasan los 1000 °C, los PCMs que normalmente son utilizados son metales o bien sales anhidras, estas sales son sales en las que no encontramos agua en su composición, normalmente suelen ser procesadas debido a la tendencia de las sales a humedecerse. Se utilizan comúnmente diversos carbonatos, cloruros, sulfatos, nitratos y nitritos, así como sus mezclas eutécticas (fusión homogénea con punto de fusión inferior), estos compuestos tienen distintas temperaturas de transición: nitratos y nitritos entre 300 y 500 °C, pero con un calor latente relativamente bajo de entre 100 y 175 J/g, los carbonatos y cloruros no se rediten hasta una temperatura de al menos 700 °C pero su calor latente es mayor, rondando los 200 J/g, las sales de flúor poseen un calor latente muy alto de unos 790 J/g para el LiF/CaF₂ autéctico aunque normalmente no es utilizado debido a su alto coste y a la mala compatibilidad con otros materiales haciendo así aún más difícil su almacenamiento.

Para el almacenamiento a altas temperaturas nuevos desafíos aparecen en cuanto a los materiales de construcción del recipiente, ya que las sales fundidas presentan unos riesgos de seguridad altos. Estas sales fundidas suelen ser corrosivas para los aceros provocando unos gases reactivos que deben ser tratados con recubrimientos y aleaciones que encarecen el sistema en caso de querer proporcionarle una vida útil lo más larga posible al sistema. Además, estos materiales poseen una conductividad térmica baja, haciendo necesaria la implementación de barras de grafito o metal para poder transferir el calor hasta el grueso del PCM. Otra posibilidad es el uso de metales en vez de sales, aunque son más caros y tienen un calor latente inferior, por el otro lado son menos corrosivos, tienen una gran conductividad térmica y por eso podemos llegar a decir que se plantean como una alternativa viable.

Aplicaciones

Una de las aplicaciones más extendidas es en plantas solares térmicas, las cuales utilizan grandes volúmenes de sales derretidas para almacenar la energía térmica del sol, al almacenar esta energía antes de usarla para generar electricidad evitamos el principal problema, la intermitente disponibilidad de radiación solar, ya que almacenando la energía durante la noche se puede seguir generando energía eléctrica, aunque las condiciones meteorológicas lo imposibiliten de manera natural.

En la mayoría de plantas solamente se utiliza el almacenamiento del calor sensible de la sal derretida, la planta de Andasol es un gran ejemplo del almacenamiento de energía térmica mediante calor latente, consta de 3 proyectos de 50 MW los cuales anualmente pueden llegar a producir 165 GWh cada uno y trabajando hasta los 400 °C, la configuración consta de espejos distribuidos que se encargan de reflejar los rayos de luz solar hacia un sistema de tuberías con bifenilo-óxido de difenilo eutéctico como fluido de transferencia del calor, tuberías las cuales llevan hasta el almacén térmico y el sistema de generación por vapor y la turbina. Andasol 1 tiene 2 almacenes caloríficos con 28.500 t de sal, con una mezcla de NaNO₃ y KNO₃ (60%-40%), esto proporciona 1000 MWh de energía al calentarlo de 300 a 400 °C y puede hacer funcionar la planta durante 7,5 h, evitando el principal problema, la intermitencia solar.



Ilustración 57 Planta solar Andasol de 150 MW ubicada en Aldeire, Granada

Otra aplicación es que el exceso de calor de un proceso en procesos continuos es almacenado en intercambiadores de calor llamados economizadores y utilizando ciclos combinados o de cogeneración. Se puede conseguir esa optimización de la energía térmica desprendida por los procesos industriales continuos gracias al almacenamiento de calor.

Un ejemplo podría ser en las fundiciones los ciclos de alta temperatura ($>250\text{ }^{\circ}\text{C}$) por lotes, esto también ocurre en las fábricas de celulosa o en la industria del cemento. Actualmente se utilizan acumuladores de calor sensible como ladrillos, los cuales recogen el calor sobrante de los gases expulsados de los hornos, calor que más tarde se utiliza para precalentar los gases de entrada a los hornos activos, reduciendo así el consumo necesario para el quemador de los gases que los prepara. Los PCMs encapsulados adecuadamente podrían sustituir a los ladrillos aumentando la densidad de energía almacenada, ya que las temperaturas de operación están bien definidas y los ciclos de almacenamiento suelen ser cortos.

Conclusión

El almacenamiento de energía térmica probablemente sea la manera más antigua que existe de almacenar energía, ya que nuestros ancestros ya valoraban el hielo para utilizarlo precisamente para este propósito. Hoy día este almacenamiento frío está bien desarrollado y es utilizado en cámaras frigoríficas, por ejemplo, esto es gracias al material más abundante y utilizado, el agua. El uso de otros PCMs, especialmente para los acumuladores a temperaturas superiores ha tenido un desarrollo más lento.

Por culpa de la necesidad de energía renovable y su inherente naturaleza intermitente, el almacenamiento por PCMs se está convirtiendo en una tecnología a tener en cuenta en el ámbito del almacenamiento térmico de energía. Numerosos proyectos con PCMs siendo incorporados en la misma estructura de un edificio se están llevando a cabo, la investigación

realizada por varias industrias se focaliza en la adición de PCMs en componentes electrónicos, paneles fotovoltaicos, textil, en aplicaciones con necesidad de una temperatura controlada y en aplicaciones de recuperación de gasto de calor, como en una fábrica.

Los desafíos más grandes en el porvenir del almacenamiento térmico de PCMs es el diseño y la integración de estos materiales en aplicaciones particulares, con el problema de la tasa de intercambio de calor siendo el principal problema. Desde el punto de vista del desarrollo se centra en el preciso entendimiento del comportamiento térmico y energético de los materiales y de los sistemas en los que se implementan, además de distintos mecanismos para acabar con el problema de la tasa de intercambio.

La encapsulación de PCMs es todavía un problema a considerar, con soluciones optimizadas para la transferencia de calor, coste y facilidad de facturación que aún están por venir. Todos estos avances generarán un aumento en el uso de PCMs para el almacenamiento térmico.

Por último, algunos químicos, científicos de materiales e ingenieros en el campo están desarrollando nuevos PCMs con características físicas mejoradas. Gracias a esto se podría conseguir evitar el principal problema de los PCMs, la tasa de intercambio, también se podría reducir el espacio necesario de los sistemas de almacenamiento mientras que a la vez se necesitaría en menor medida de los procesos de encapsulación y facilitar su fabricación.

Almacenamiento de calor sensible

Se trata del almacenamiento de calor o frío en un material mediante la variación de su temperatura sin que se lleve a cabo ningún cambio de fase como hemos visto anteriormente, el medio más utilizado para conseguir esto suele ser el agua debido a su bajo coste, abundancia, y gran capacidad calorífica, aunque otros sólidos como el cemento o la roca también son utilizados.

Normalmente se utiliza el almacenamiento de calor sensible para la calefacción de un edificio, para almacenar el agua caliente de una vivienda, también se suelen juntar normalmente con sistemas de energía térmica solar para cubrir por ejemplo una gran porción de las exigencias energéticas de un edificio.

La cantidad de calor que podemos almacenar con este método es directamente proporcional al calor específico del material, su masa y la diferencia de temperaturas asociada con el proceso, por esta razón materiales sólidos y líquidos los cuales tienen una alta masa y un calor específico alto son también normalmente utilizados, este aumento en la densidad energética permite al acumulador ser compacto reduciendo el coste de implementación y del almacenamiento energético. Además, la menor superficie que se consigue con un acumulador más compacto conlleva menos pérdidas térmicas con los alrededores.

Estanques solares

La energía solar ya se plantea como uno de los principales sustitutos a la generación eléctrica convencional, aunque se trate de una energía intermitente y con una naturaleza inestable, lo cual le genera el problema de la disparidad entre suministro y demanda.

Para mejorar el porcentaje de la cantidad de radiación solar que utilizamos y hacer los sistemas solares más prácticos y atractivos el almacenamiento de energía térmica hoy día ya se ha de contemplar como un complemento crucial en las aplicaciones que utilicen la energía solar. Esta tecnología utiliza reacciones termoquímicas o el calor sensible y latente de los materiales para proporcionar un recurso que enfríe o caliente, que además se pueda recargar para poder liberar esa energía en el momento preciso. En el almacenamiento mediante calor sensible el calor es almacenado al aumentar la temperatura del material, la cantidad de calor que podrá almacenar es proporcional a la densidad, calor específico, volumen y variación de temperatura del material acumulador. El rendimiento depende principalmente de la densidad y del calor específico de la substancia que utilicemos, determinando así el volumen que necesitamos.

El agua es uno de los mejores líquidos para el almacenamiento de calor a bajas temperaturas, ya que tiene un calor específico más alto que cualquier material, es muy accesible y fácil de encontrar. Los cuerpos de agua superficial como embalses y lagunas pueden utilizarse para recoger y almacenar calor proveniente del sol. En donde exista un gradiente de salinidad superior resultará en una mayor concentración de sal y densidad en el fondo del estanque, por lo que el calor almacenado se mantendrá en esta parte inferior ya que el propio gradiente de salinidad inhabilita la convección natural y el agua fría de la superficie actuará entonces como un aislante natural. Existen muchos factores los cuales afectan el tamaño económico y de la operación, factores como el área recolectora, las condiciones meteorológicas, las características del propio sistema y su aplicación.

La primera vez que se documentó la existencia de un estanque natural debido a un fenómeno natural fue en 1902 en Transilvania, Hungría, donde se encontraron temperaturas de 70 °C a una profundidad de 1.32 m al final del verano en el lago Medve. El concepto de los estanques solares artificiales que almacenasen energía térmica solar se propuso a mitad del siglo pasado. Las corrientes de convección que normalmente se generan por la presencia de agua caliente en el fondo y agua fría la superficie son minimizadas por la presencia de un gradiente de densidad desde el fondo hasta la superficie, por lo que el agua en las zonas más bajas puede ser más caliente sin que simultáneamente se esté disminuyendo la densidad y la convección con la parte superior.

Las características más atractivas de los estanques son varias, para empezar su capacidad de almacenar la energía durante largos periodos de tiempo, capacidades que llegan a almacenar calor suficiente para suministrar calor suficiente durante un año, también recalcar su rango de eficiencia de recolección anual, entre un 15 y un 25 % para todas sus localizaciones incluso a latitudes superiores. Se ha descubierto que los estanques con superficies de alrededor de los 1000 m² o más son más efectivas económicamente que recolectores con eficiencias superiores, debido a su bajo coste por metro cuadrado.

Existen varios tipos de estanques solares y la mayoría de estos se basan en el uso del gradiente de salinidad, podemos clasificarlos según estos factores básicos: si se permite una convección

natural o no, particionada (multicapas) o no, colector separado del almacenamiento o almacenamiento dentro del estanque.

Aunque la mayoría de esfuerzos en la investigación actual se centran en el estanque de gradiente de salinidad que no permite la convección, ya que se trata de la alternativa más sencilla y fácil de ejecutar.

Estanque solar de gradiente de salinidad

Este tipo de estanques cuentan con 3 zonas dentro del propio estanque. La primera, ubicada en la superficie y que contiene la mezcla de agua y sal menos densa es la región de absorción y transmisión, se conoce a esta región por el nombre de zona superior convectiva (Upper Convective Zone, UCZ), la cual además tiene la función de proteger la del gradiente de salinidad. La segunda zona contiene una densidad de agua y sal variable según su profundidad es la zona no convectiva (NCZ) o la zona del gradiente, la cual se encarga de actuar como aislante para evitar que el calor se escape a la vez que mantiene unas altas temperaturas en las zonas más profundas, por último esta la zona de almacenamiento de energía, se trata de salmuera saturada con prácticamente una densidad y salinidad homogéneas, algunas de las sales que se utilizan son el cloruro de sodio, cloruro de magnesio o nitrato de magnesio, estas sales se disuelven en agua y depende de la profundidad variarán su concentración, siendo del 20 al 30 % en el fondo a casi 0 en la parte superior de la zona.

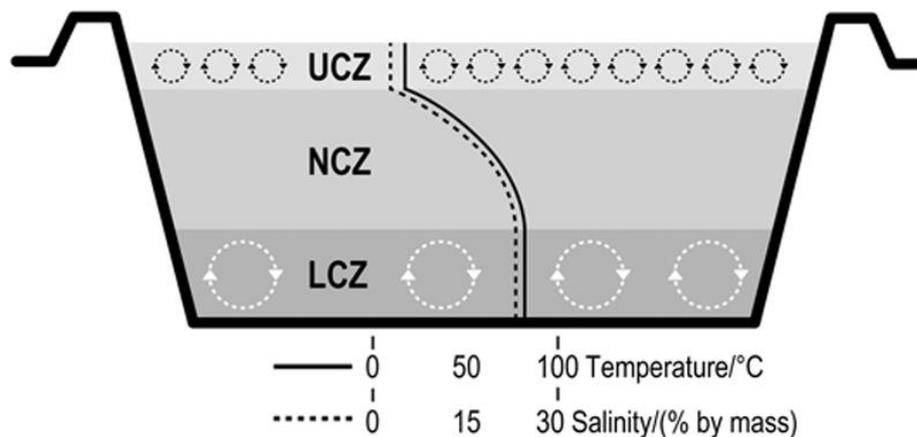


Ilustración 58 Representación de un estanque solar

Cuando la radiación solar incide parte de esta radiación es reflejada fuera del estanque aunque la mayoría se transmite a la parte inferior del estanque, una parte de esta radiación transmitida es rápidamente absorbida por la zona superior (UCZ), aunque este calor absorbido por la zona superior será perdido por convección con la atmósfera, alguna de la radiación restante es absorbida por la capa central antes de que el resto llegue a la parte inferior del estanque, en esta zona inferior la radiación es transformada en calor y almacenada como calor sensible en la salmuera mayor concentración de sales. Al no existir pérdidas por convección en la zona inferior la temperatura puede aumentar sustancialmente. La diferencia de temperatura entre la superficie y el fondo puede llegar a los 60 °C.

A la hora de la creación de estos sistemas hemos de buscar lugares que tengan facilidad para poder adquirir salmuera o sales, agua y un terreno lo suficientemente grande ya que estos son los requerimientos esenciales y principales a la hora de indicar localizaciones potenciales.

También se ha de escalar el tamaño del estanque según la demanda que vayamos a tener, aunque el factor más importante es la radiación solar, ya que cuanto más radiación afecte a la zona seleccionada mayor será la eficiencia del sistema.

Las pérdidas de calor con el suelo también deben de tenerse en cuenta, ya que aproximadamente entre el 15 y el 20 % de la radiación recibida está disponible para extraerse, resultando en un aumento de 40-50 °C sobre la media diaria de la temperatura de la localización. La profundidad del estanque afecta directamente al rendimiento térmico, ya que normalmente el estanque este situado en tierra excavada a una profundidad de 3-4 m, al profundizar más aumentamos la cantidad de calor que podemos almacenar como resultado de la reducción de pérdidas de calor y el aumento de la eficiencia térmica del estanque.

La estratificación de las capas, que se podría entender como la separación de capas con distintas densidades, se hace artificialmente, antes de poner en marcha el sistema el estanque debe permanecer con las características del diseño, ya que es crucial que a la hora de calentarse la densidad del fondo debe ser mayor a la superior, si esto no se cumple probablemente se empiecen a mezclar las capas de la salmuera.

Hoy día existen 3 métodos para asegurar la correcta puesta en marcha del gradiente de densidades de la sal: difusión natural, apilado y redistribución. El primer método está basado en la difusión natural entre una capa de agua y una capa de una solución de sales saturadas, se llena la mitad superior de agua y se mantienen las concentraciones añadiendo tanto sales en el fondo como agua en la superficie generando así un gradiente salino de manera natural. En el método de apilamiento primero se coloca una capa de una solución concentrada de sal y otras capas con concentraciones distintas, la ventaja práctica de este método es que primero se coloca la primera capa y se siguen colocando capas menos densas que quedan superpuestas, al tratarse de un método tan simple es muy utilizado.

El último método es considerado como el más apropiado cuando hablamos de sistemas con una superficie grande, el primer paso es llenar hasta la mitad de la profundidad de la zona del gradiente planeada con una salmuera de una gran concentración, entonces se inyecta agua normal o con una baja salinidad de manera horizontal mediante un difusor, el agua revolverá y diluirá de manera uniforme la salmuera sobre el difusor, esta inyección comienza desde el límite deseado entre la NCZ y la LCZ, a medida que la inyección prosigue y el nivel aumenta el difusor se va elevando simultáneamente poco a poco dentro de la salmuera hacia la superficie del estanque, la velocidad de subida del difusor es el doble que la velocidad a la que el nivel del agua debe aumentar, ya que esto se realiza para que lleguen a la vez al límite entre la UCZ y la NCZ, por último solamente falta añadir agua a la parte superior.

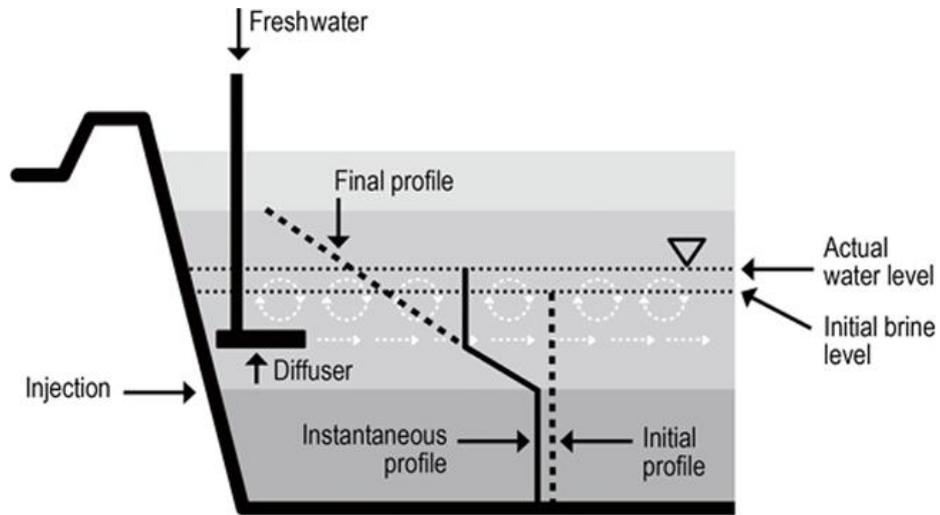
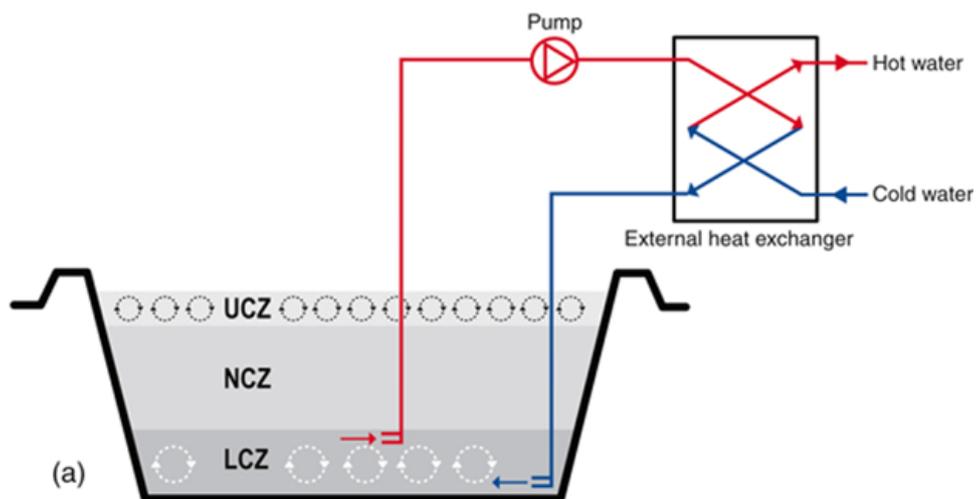


Ilustración 59 Esquema del método de redistribución

Para extraer el calor de la LCZ de un estanque solar, el primero y más utilizado es bombear la salmuera caliente directa desde la LCZ a través de un difusor para prevenir una excesiva velocidad y movimiento en el estanque minimizando así el impacto en la zona del gradiente. Un intercambiador de calor es entonces utilizado para extraer el calor, haciendo volver la salmuera enfriada a la LCZ.



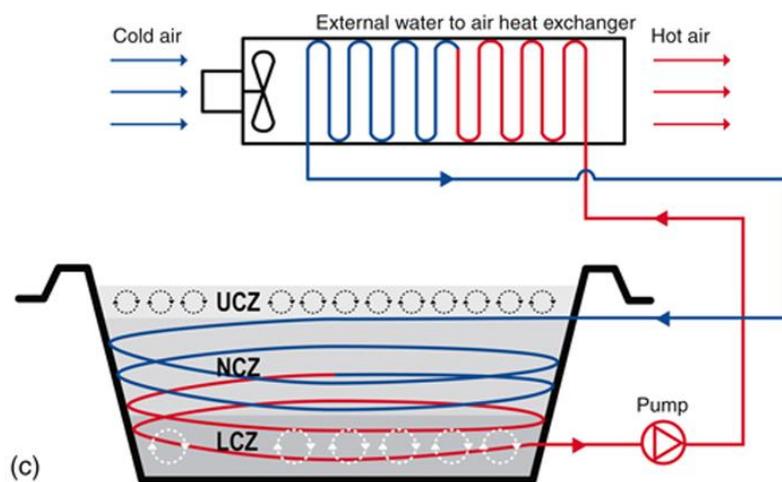
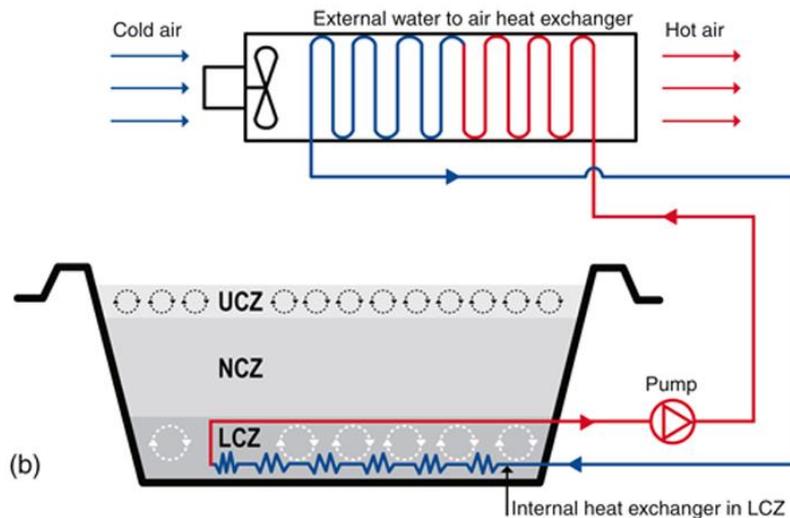


Ilustración 60 Intercambiador de calor externo

Ilustración 61 Intercambiador de calor interno

Ilustración 62 Intercambiador de calor interno en la zona gradiente

El segundo método requiere de un intercambiador de calor situado en la LCZ, siendo su posición más efectiva justo debajo de la zona del gradiente, de manera que el calor extraído pueda estimular la convección natural desde la parte inferior, retirando así calor del mayor volumen posible, normalmente el fluido intercambiador suele ser agua ya que así se habilita la posibilidad de hacer la construcción con materiales de bajo coste como podrían ser plásticos y seguir consiguiendo un resultado bastante decente. La baja conductividad térmica de las tuberías de plástico puede ser paliada por ejemplo aumentando el área en la que se intercambia calor, añadiendo más tuberías o aumentando el diámetro de estas.

Los mayores problemas vienen por la dificultad de acceder a estas zonas ya sea para implementar el intercambiador o para realizar algún mantenimiento. En la imagen anterior vemos una propuesta en la que también se extrae calor de NCZ, esta metodología se presenta como la más eficiente teóricamente, llegando a poder aumentar hasta un 55% la eficiencia térmica con respecto a los métodos convencionales que solamente hacen servir la LCZ.

Se ha estado estudiando la manera de producir energía eléctrica gracias a este almacenamiento térmico. El mayor proyecto que podemos contemplar hoy día está situado en Israel, cerca del Mar Muerto dónde se utiliza un estanque solar de 210000 m² con una profundidad de 4.5 m que conecta con una turbina calorífica la cual se hace servir del ciclo de Rankine, un ciclo termodinámico el cual trata de convertir el calor en trabajo suministrando este calor a un ciclo externo con un ciclo cerrado que suele utilizar agua cómo fluido de trabajo y que se utilizará para hacer girar una turbina generadora, la turbina situada en Israel es de 5 MW. Este mismo método se ha utilizado en diversos proyectos, en El Paso haciendo valer un estanque de 3700 m² consiguiendo así una planta generadora de 100 kW, o en Alice Springs (Australia) con una planta de 20 kW gracias a un estanque de 1600 m². Estas turbinas dependientes del ciclo de Rankine están diseñadas para producir calor gracias a fuentes de calor de relativa baja temperatura (80-90 °C), el líquido orgánico que absorbe el calor de la salmuera caliente se vaporiza bajo unas relativas condiciones de alta presión, se expande a través de una turbina especial de vapor y después se condensa a una presión muy cercana a la atmosférica, para así poder comenzar nuevamente el ciclo. Debido a esta baja temperatura de funcionamiento el estanque solar necesita fluidos orgánicos de trabajo con puntos de ebullición bajos, las características de estos fluidos simplifican el diseño de la turbina y en general del sistema de transmisión de calor. La eficiencia térmica se ve restringida por esto mismo, debido a las bajas temperaturas de trabajo la relación de conversión de energía térmica-eléctrica del orden del 7%, este bajo rendimiento de la turbina es lo que dificulta en gran medida su viabilidad económica.

La idea de añadir una chimenea al sistema del estanque solar para la generación eléctrica ha sido evaluada y presentada en distintos proyectos. La incorporación de una turbina de aire en una chimenea solar para la desalinización del terreno y producción energética, los resultados indicaron que el sistema era capaz de producir de manera seguida en cualquier momento ya fuera de día o de noche de una manera estable y eficiente.

Otros estudios se centran en la aplicación de conceptos termoeléctricos evitando así la mala conversión entre la energía térmica y la eléctrica. Algunos de estos estudios juntan módulos termoeléctricos a la planta de gradiente de sal para la generación eléctrica. Un generador termoeléctrico es aquel que directamente transforma el calor en electricidad, este proceso se basa en el efecto Seebeck el cual dice que una diferencia de temperatura entre 2 conductores o semiconductores eléctricos distintos se produce una diferencia de tensión. El generador termoeléctrico está diseñado para producir este efecto con el agua caliente y el agua fría de la zona del gradiente de sal entre la UCZ y la LCZ utilizando una diferencia de temperatura de entre 40 y 60 °C para hacer servir el módulo termoeléctrico.

Los estanques solares pueden tener otras utilidades más allá de la propia generación, pueden ser utilizados para mitigar la salinidad de un terreno, para la producción de químicos, además del uso cómo almacén térmico para el mantenimiento de edificios y calefacción. Alrededor del mundo tierras productivas se están viendo amenazadas por el aumento de la salinidad del terreno por culpa de diversos factores como la tala de los árboles, para la mitigación se utilizan cuencas en las que se deposita el agua salada y la propia radiación solar evapora el agua dejando atrás la sal, esto podría añadirse al esquema de un estanque solar haciendo servir la UCZ para este método, pero a la vez almacenando la energía térmica para después poderse extraer desde la LCZ.

Como conclusión que extraigo es que se trata de una forma de almacenar energía bastante madura, aunque aún con un gran crecimiento posible en un futuro debido a el desarrollo de materiales con condiciones físicas cada vez mejores, que además de mejorar la eficiencia de los sistemas aumentan su viabilidad gracias a los avances en estabilidad, densidades térmicas y en términos generales, facilidades para su implementación. Además al provenir de una fuente energética tan común como es todo lo que genere energía térmica, que además de la producción diaria base que ya poseemos debido al sol, en muchos procesos industriales y otras aplicaciones esta energía térmica es muchas veces desperdiciada totalmente, otro factor a favor es que normalmente tanto como para almacenar como para transmitir el calor es muy común utilizar agua, un recurso muy barato, muy fácil de obtener y del que conocemos perfectamente su funcionamiento.

Proyecto de aplicación

La intención de este proyecto es pre-diseñar un sistema de calefacción de distrito como el que hemos visto anteriormente, el cual tiene como propósito suministrar energía térmica para así acondicionar la calefacción de los espacios de una urbanización que supondremos de 25 chalets iguales entre sí. En este proyecto no diseñaremos la red de distribución desde el tanque acumulador hasta las viviendas ni el tanque del acumulador térmico.

Estos chalets serán adosados de una sola planta, de una superficie construida de 97.8 m^2 , aunque la superficie con la que trabajaremos será inferior, debido a que no se climatiza toda superficie en la vivienda como los pasillos, por lo que utilizaremos el 80% de su superficie, 78.24 m^2 . En la fachada contamos con una superficie de 110 m^2 , de los cuales restaremos el 16 % para tener en cuenta los espacios dedicados a puertas y ventanas, obteniendo así una fachada de 92.4 m^2 .

Para el comienzo del diseño dejaremos claras las partes de las que constará nuestro sistema, una central recolectora en la que recogeremos la radiación mediante colectores, un sistema de almacenamiento térmico estacional y un sistema de distribución encargado de distribuir el calor a los puntos de consumo.

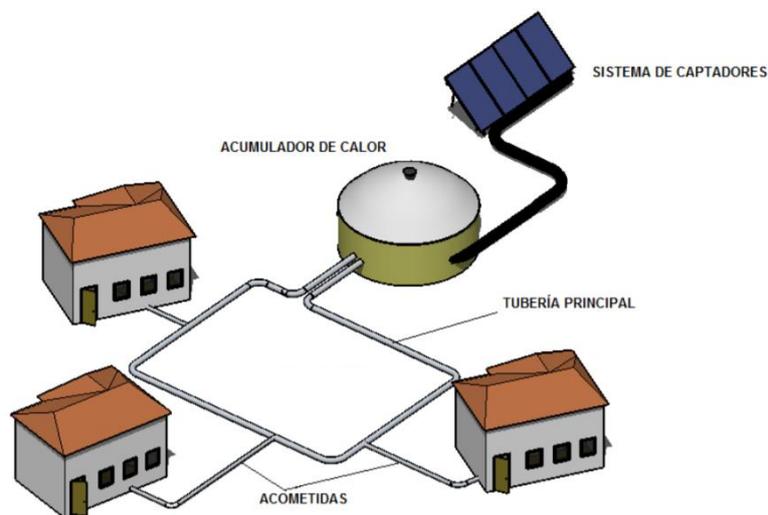


Ilustración 63 Esquema de sistema de calefacción de distrito.

Captador solar

Se trata de un elemento imprescindible en los sistemas térmicos de calefacción solar, existen distintas variedades según su uso, principalmente a la hora de seleccionar un captador tendremos en cuenta la temperatura de trabajo y condiciones climáticas de nuestra instalación, aunque existan otros factores importantes como la limitación económica o el espacio del que dispongamos para colocar estos. Existen distintos tipos los cuales difieren principalmente en su temperatura de trabajo, hablamos de captadores planos hasta unos aproximados 60 °C, el siguiente rango en el que trabajamos hasta unos 400 °C encontramos captadores de vacío y concentradores y por último desde 400 a 3000 °C se utilizan parques de helióstatos.

En nuestro caso debido a que trabajaremos con una temperatura relativamente baja (hasta unos 60°C), optaremos por la opción de utilizar captadores planos, los cuales poseen una estructura sencilla la cual permite posicionarlos más fácilmente para nuestro interés y una relación rendimiento coste bastante competente, para ser más concretos utilizaremos los colectores Caotec CAO TLP.

Esta selección como hemos comentado se ha llevado a cabo viendo la necesidad del PCM que utilizaremos, al utilizar ClimSel C48 podemos ver que no necesitaremos de unas temperaturas realmente altas, inferiores a 60 °C ya que nuestro material almacena energía en el rango de 48 a 53 °C.

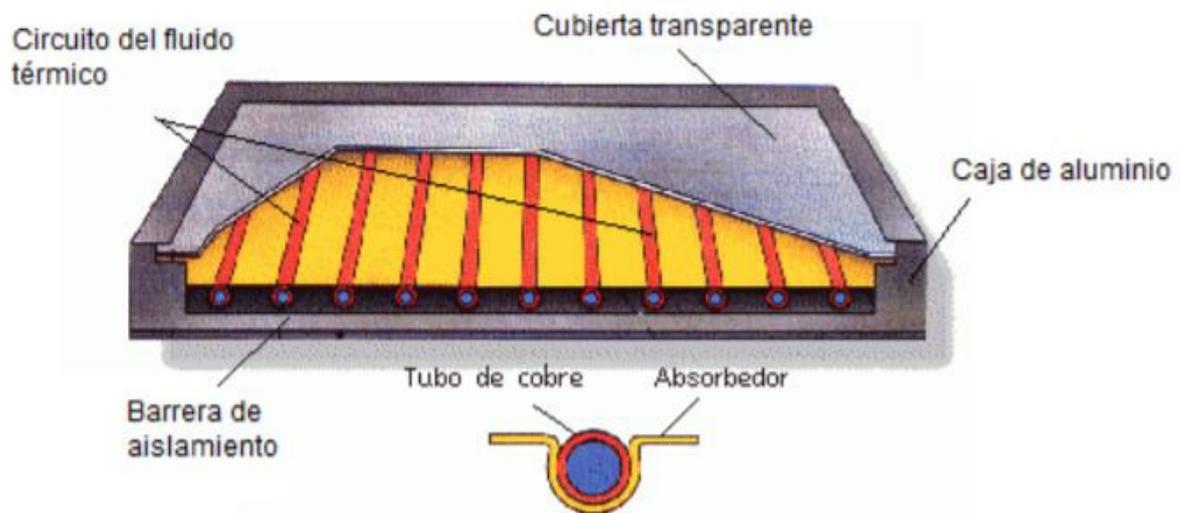


Ilustración 64 Representación gráfica del funcionamiento de un captador plano

Para el cálculo del número de captadores que vamos a necesitar es necesario tener la demanda, la cual calculamos más adelante, además de la irradiación que poseerá la ubicación a lo largo del año. La diferencia entre la irradiación que podríamos tener y la que como máximo alcanzaremos es debido al rendimiento del captador, el rendimiento de estos sistemas se calcula mediante iteraciones con valores obtenidos de la ficha técnica del fabricante. A continuación, utilizando la potencia diaria más alta, en nuestro caso Julio y la demanda más desfavorable

obtenemos un resultado de 584.28 m² necesarios, sabiendo que la superficie de nuestro captador es de 1.818 m² necesitaremos 321.4 captadores, redondearemos a 322.

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Irradiación registrada [kWh/m ²]	89,1687903	104,422518	161,465945	181,016835	193,059083	173,488308	209,113089	207,550512	190,598116	177,957894	121,975078	95,988439
Potencia térmica mensual [kWh/m ²]	41,8396648	52,5203453	89,2553613	106,931254	113,603986	105,17738	140,805949	138,303433	122,609077	108,629072	66,6586159	46,9968504
Potencia térmica útil mensual [kWh/m ² día]	1.34966661	1.87572662	2.8792052	3.56437513	3.66464472	3.50591265	4.54212739	4.46140105	4.08696923	3.50416363	2.22195386	1.51602743

La instalación la colocaremos sobre el terreno y con una inclinación de 40° orientada hacia el sur para así maximizar la radiación global obtenida. Al posicionarlos en el terreno también deberemos de dejar una distancia mínima para así evitar las sombras producidas por los propios captadores. Esta separación cumplirá que en el día más desfavorable durante el mediodía solar la sombra de la arista superior debe proyectarse como máximo antes de la arista inferior de la siguiente fila, en nuestro caso el día más desfavorable es el día 21 de diciembre a las 12:00 del mediodía donde necesitamos una distancia 2.055 veces superior a la longitud de la placa, en nuestro caso al ser de 2.020 m la distancia que deberemos respetar es de 4.15 m entre cada fila.

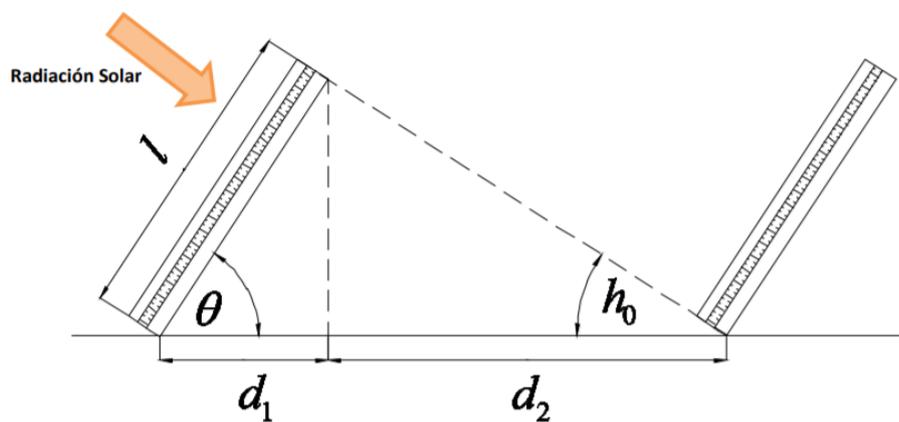


Ilustración 65 Visualización de sombra solar producida por los captadores.

A la hora de elegir el fluido encargado de la transición del calor hasta el PCM circulará por el circuito primario, algunas características que este debe poseer son tales como no ser corrosivo, poseer un calor específico elevado y una buena conductividad térmica, no ser tóxico ni contaminante con el medioambiente, que su viscosidad sea baja reduciendo pérdidas por fricción y por último debe de ser estable, evitando así perder sus facultades a lo largo del tiempo para así poder mantener las características de diseño. Debido también a la gran disponibilidad y bajo precio el agua suele ser un buen fluido de transmisión de calor, aunque durante el invierno las bajas temperaturas pueden llegar a congelar ciertas tuberías al igual que en verano una temperatura demasiado elevada podría llevar el agua a ebullición. Nosotros usaremos una mezcla de agua-etilenglicol con una concentración de glicol del 33% ya que así es como nos lo recomienda el fabricante en la ficha técnica del captador.

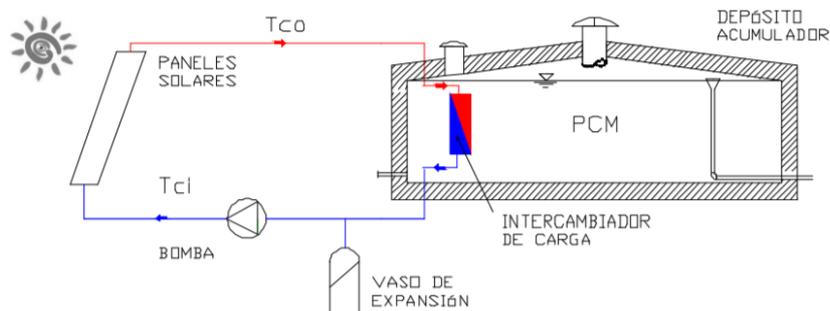


Ilustración 66 Diagrama del sistema de captación

Arriba podemos ver el esquema que se utilizará para nuestro circuito solar, la adición de la bomba nos permitirá poder controlar el caudal y con ello la transferencia térmica que deseemos, el problema volumétrico del cambio de estado del PCM será absorbido por el vaso de expansión.

Alguna de las ventajas de colocar los colectores sobre el terreno aunque no sea una práctica habitual, ya que suelen colocarse sobre las propias edificaciones aprovechando el espacio de cada vivienda que ya está orientado al sol y en desuso, es la facilidad del mantenimiento y control de la instalación al juntar todos los captadores solares en un área reducida, además la idea de actuar como una central térmica en la que las viviendas solamente deben conectarse a esta mediante la distribución es una idea que si disponemos del espacio necesario no solamente simplifica con el mantenimiento, sino que también facilita las cosas en caso de ampliaciones urbanas..



Ilustración 67 Colectores sobre el terreno, Martal en Dinamarca

Para el PCM hemos escogido el Climsel 48, escogido principalmente por sus altos valores de calor latente, una alta conductividad térmica, su disponibilidad, es barato, reciclable y biodegradable, además de no ser inflamable. Algunos de los problemas serían que su encapsulamiento suele generar problemas debido a sus características de inadaptación (inestabilidad, corrosión y la tendencia a sufrir sobre enfriamiento) con las paredes del tanque. Al seleccionar el material con una temperatura de cambio de fase bien definida de 48 °C nos permite mantener esta temperatura constante y no muy elevada en la instalación.

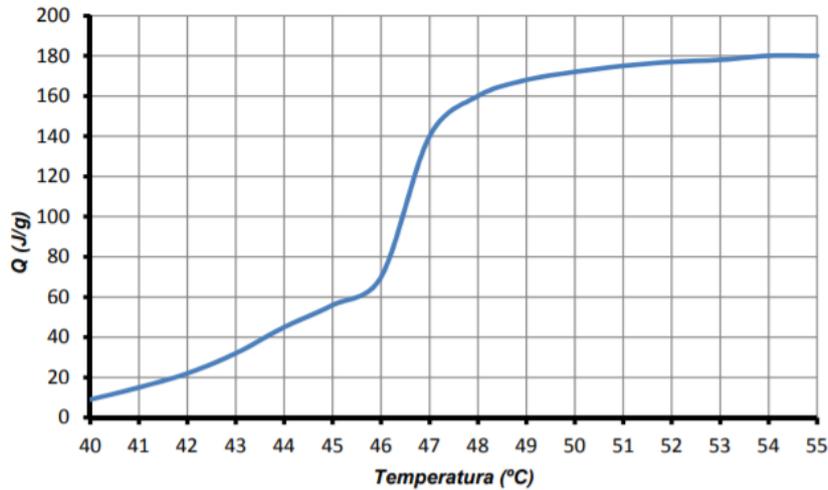


Ilustración 68 Comportamiento del Climsel 48

Demanda

En este paso queremos calcular las necesidades térmicas de los chalets que conforman el estudio

Cargas térmicas

Lo que conocemos como carga térmica de un edificio es la potencia de refrigeración o calefacción en Watios necesaria para cubrir la demanda de energía del lugar, por lo que para calcular la demanda energética primero deberemos conocer sus cargas térmicas. Este concepto trata los sucesos que tienden a modificar la temperatura y la humedad. Esta dependerá de la función que queramos darle al sistema, de las propiedades de sus cerramientos o de su localización. Nosotros buscaremos cubrir una temperatura interior de 21°C, también deberemos de comprobar la temperatura exterior más desfavorable a la que nos enfrentaremos, en el caso de Madrid es de -3.7°C.

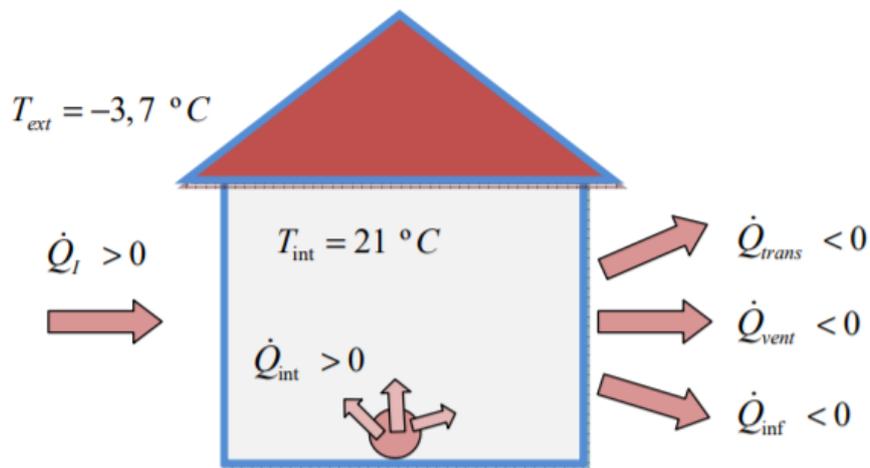


Ilustración 69 Diagrama de balance térmico para una vivienda

Q_i = potencia térmica por irradiación solar, Q_{int} = potencia térmica debida a cargas interiores

Q_{trans} = potencia térmica debida a través de cerramientos, Q_{vent} = debida a la ventilación voluntaria, Q_{inf} = debida a las infiltraciones.

Resumiendo, sólo calcularemos las 3 cargas que restan calor a la estancia.

Cargas por transmisión

Básicamente hablamos de la potencia térmica que se pierde en las viviendas por culpa de los cerramientos que la engloban (muros en contacto con el exterior, techos, suelos, ventanas, puertas etc.).

$$Q_{trans} = U * A * \Delta T$$

Q_{trans} : potencia térmica que se pierde por cerramientos

U es el coeficiente global de transferencia de calor ($W / (m^2 \text{ } ^\circ C)$), es la inversa de la resistencia térmica total (suma de las resistencias térmicas de los materiales de los cerramientos)

A es la superficie del cerramiento

ΔT es la diferencia entre las temperaturas a cada lado del cerramiento

Para calcular estas resistencias deberemos sumar las resistencias tanto del aire exterior como interior (R_{se} , R_{si}):

$$R_m = \sum \frac{e_i}{\lambda_i} + R_{se} + R_{si}$$

Dónde e_i es el espesor de cada material que compone el cerramiento y λ_i su conductividad.

Este proceso lo llevamos a cabo tanto con las paredes exteriores cómo con el techo, con el suelo y con las puertas y ventanas.

Cerramiento	U [W / m ² K]	S [m ²]	U x S [W / K]	ΔT [°C]	\dot{Q} [W]
Muros exteriores	0,499	92,400	46,108	24,700	1138,858
Techo	0,353	78,240	27,619	24,700	682,182
Suelo	0,432	78,240	33,800	19,000	642,194
Puertas y ventanas	3,000	17,600	52,800	24,700	1304,160
Total					3867,394

Ilustración 70 Cargas térmicas por transmisión a través de los cerramientos

Tendremos que tener en cuenta un suplemento debido a la intermitencia del sistema.

$$Q_{total} = Q_t * 1.15 = 4450 \text{ W}$$

Cargas térmicas por ventilación

En las instalaciones de calefacción la renovación del aire es un factor que se debe considerar, ya que de esta manera podremos asegurarnos de la debida calidad del aire, de la ausencia de olores, de la suficiente cantidad de oxígeno. A la hora de calcularlo deberemos de tener en cuenta las veces que renovaremos el aire por hora, en nuestro caso será una vez por hora.

$$Q_{vent} = V * \rho_a * c_{Pa} * \Delta T * N_{ren}$$

Dónde encontramos el volumen del espacio que queremos climatizar, la densidad del aire equivalente a 1.2 Kg/m^3 , el calor específico del aire de 1 Kj/Kg K , el salto térmico y el número de repeticiones horarias.

$$Q_{vent} = (78.24 * 2.5) * 1.2 * (21 - (-3.7)) * 1 = 5802 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = 1612 \text{ W}$$

Cargas térmicas por infiltración

En las viviendas existen grietas, rendijas y otras aperturas generan un flujo de calor perdido ya que no hablamos de instalaciones herméticas. En nuestro caso la estimaremos como el 30% de la carga de ventilación.

$$Q_{inf} = 0.3 * Q_{vent} = 0.3 * 1612 = 484 \text{ W}$$

Por lo que la carga térmica total de nuestro sistema será la suma de las 3 cargas térmicas que tendremos que compensar. Con un valor total de 6546 W . Con esto podemos entonces calcular el coeficiente de transmisión de calor de la vivienda

$$Q_t = (Ua)_g * (T_{int} - T_{ext}) \rightarrow (Ua)_g = \frac{6546}{21 + 3.7} = 265 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

Demanda de la instalación

El objetivo es simular la demanda del sistema gracias a los datos obtenidos anteriormente, para calcularlos utilizaremos la siguiente expresión.

$$Q_t = (Ua)_g * (T_{int} - T_{ext})$$

En la que conocemos todas las variables menos la T_{ext} ya que esta variará a lo largo del año variando así la necesidad de nuestro sistema. Al tratarse de un sistema de calefacción el sistema solamente estará activo en los meses de invierno, siendo estos enero, febrero, marzo, noviembre y diciembre. Además, el sistema contará con una temperatura mínima de consigna,

por lo que el sistema solamente estará operativo cuando la temperatura exterior sea inferior a 17 °C, en caso de no ser así la demanda será 0.

$$Qt = 0.26 * (21 - T_{ext}) Kwh$$

Las gráficas de la demanda térmica anual la podemos calcular a continuación, como ahora veremos, es lógico que en los meses de diciembre y enero al ser los meses más fríos del año, la demanda es inherentemente mayor, y va disminuyendo a medida que se acerca al verano.

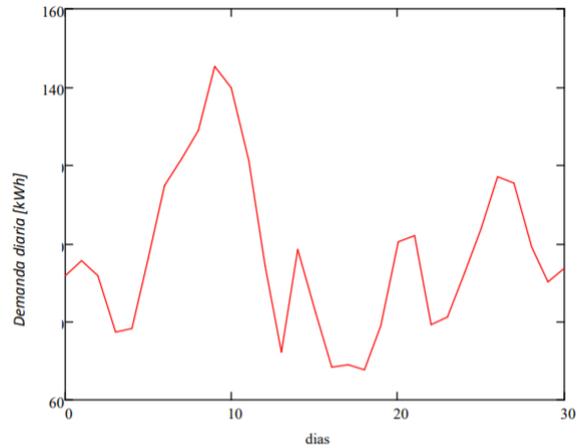


Ilustración 71 Demanda del mes de enero (3009 Kwh)

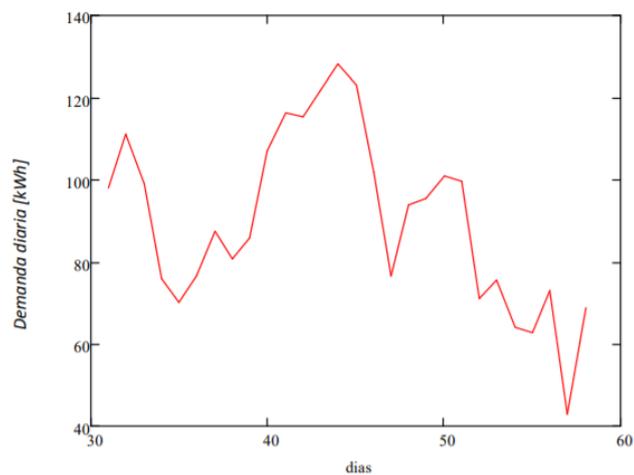


Ilustración 72 Demanda del mes de febrero (2522 Kwh)

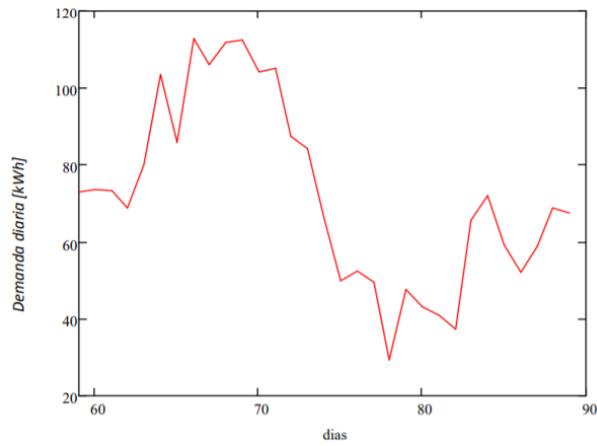


Ilustración 73 Demanda del mes de marzo (2239 Kwh)

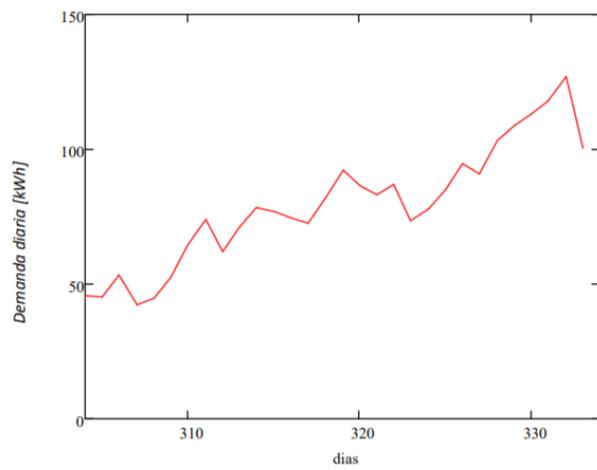


Ilustración 74 Demanda de noviembre (2841 Kwh)

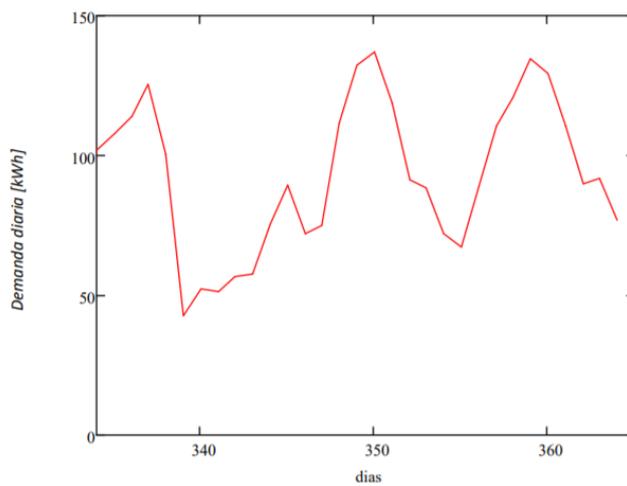


Ilustración 75 Demanda de diciembre (2889 Kwh)

El valor final con las correcciones realizadas es de 13040 Kwh durante los meses de invierno, mientras que en el resto de meses es 0

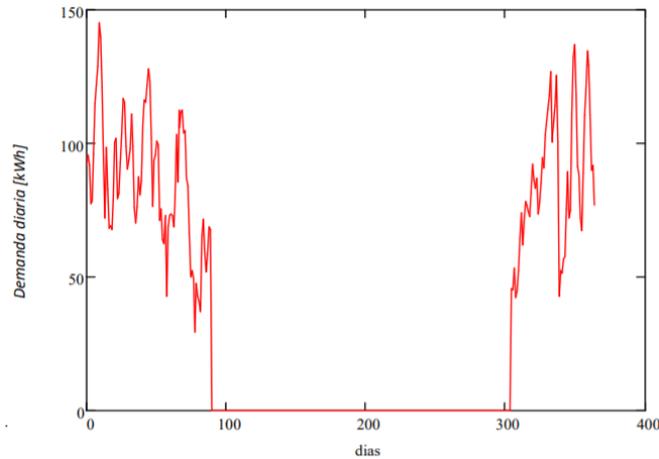


Ilustración 76 Demanda térmica bruta en invierno con temperatura de consigna e 17 °C

Al final la gráfica anual de la demanda por vivienda es la que podemos contemplar.

Consumo de ACS (agua caliente sanitaria)

La instalación de agua caliente sanitaria está diseñada para producir agua caliente a través de la energía del sol que se recoge mediante el uso de los captadores, esta se almacenará para su posterior uso, según la demanda necesitada por la vivienda modelo. Para ello necesitaremos estimar la cantidad de agua que una persona utiliza diariamente, en este caso tomaremos como valor personal una cantidad de 30 litros por persona, estos valores pueden ser consultados en el código técnico de la edificación en España.

Criterio de demanda	Litros ACS/día a 60° C	
Viviendas unifamiliares	30	por persona
Viviendas multifamiliares	22	por persona
Hospitales y clínicas	55	por cama
Hotel ****	70	por cama
Hotel ***	55	por cama
Hotel/Hostal **	40	por cama
Camping	40	por emplazamiento
Hostal/Pensión *	35	por cama
Residencia (ancianos, estudiantes, etc)	55	por cama
Vestuarios/Duchas colectivas	15	por servicio
Escuelas	3	por alumno
Cuarteles	20	por persona
Fábricas y talleres	15	por persona
Administrativos	3	por persona
Gimnasios	20 a 25	por usuario
Lavanderías	3 a 5	por kilo de ropa
Restaurantes	5 a 10	por comida
Cafeterías	1	por almuerzo

Ilustración 77 Valores recomendados por CTE

Al estar hablando de un chalet unifamiliar supondremos nuevamente que la familia está compuesta por 4 miembros, aumentando de esta manera el consumo hasta 120 l diarios.

Para calcular la carga térmica que necesitaremos ara abastecer el sistema haremos uso de la siguiente ecuación.

$$Q_{acs} = M * N * C_p * (T_{cons} - T_{red})$$

Al referirnos a M estamos hablando del consumo medio diario de agua caliente, N es el número de días mensuales, Cp la capacidad calorífica del agua con un valor de 4180 J/Kg K, luego la temperatura constante será de 48 °C que es la temperatura que nuestro sistema mantendrá a lo largo del año y la temperatura de la red dependerá de la fecha del año. Con valores que podemos encontrar en la guía de Gas Natural.

Enero	120	31	7	621.984,00	174,16
Febrero	120	28	7	561.792,00	157,30
Marzo	120	31	8	590.884,80	165,45
Abril	120	30	11	541.728,00	151,68
Mayo	120	31	12	528.686,40	148,03
Junio	120	30	15	466.488,00	130,62
Julio	120	31	17	435.388,80	121,91
Agosto	120	31	16	450.938,40	126,26
Septiembre	120	30	15	466.488,00	130,62
Octubre	120	31	11	544.236,00	152,39
Noviembre	120	30	9	571.824,00	160,11
Diciembre	120	31	7	621.984,00	174,16

TOTAL 1.792,68Kwh/año

Deberemos de tener en cuenta que este consumo es individual para cada vivienda, por lo que el total será 25 veces mayor, además según el reglamento español la temperatura del agua caliente sanitaria debe ser de 60 °C, por lo que necesitaríamos un extra de generación para acabar de elevar la temperatura 12 °C, esta generación puede ser eléctrica con un termo o con un sistema de gas natural o diesel.

Volumen de la instalación

La demanda total que deberemos cubrir es la total de la urbanización, es decir tanto la energética como la de agua caliente de todas las viviendas, siendo el total de cada vivienda de 14832 Kwh la energía total que deberemos de cubrir será de 370800 Kwh anuales.

En los datos del Climsel 48 obtenemos que su calor latente es de 50 Wh/kg por lo que ya podemos calcular la cantidad de material que necesitaremos para almacenar tal energía.

$$masa_{PCM} = \frac{370800 \text{ Kwh}}{50 \times 10^{-3} \text{ Kwh /Kg}} = 7416000 \text{ Kg}$$

$$Volumen_{PCM} = \frac{7416000 \text{ Kg}}{1.3 \text{ Kg/l}} = 5704615.4 = 5704.62 \text{ m}^3$$

A la hora del almacenamiento, utilizaremos un tanque cilíndrico subterráneo de radio de 13 m y altura de 11 m, con un volumen total de 5840 m³. La propuesta de enterrar el tanque es debido a que, aunque principalmente sea un capital superior el inicial en comparación con un tanque habitual, la reducción en pérdidas térmicas y el ahorro de espacio en la superficie es significativa.

Algo que debemos tener en cuenta es que nuestro sistema deberá cumplir un ciclo anual, en el que la energía acumulada al final del ciclo sea 0 habiendo podido liberar el total de lo almacenado, pudiendo así maximizar la eficiencia del sistema al no reservar calor durante un tiempo excesivo. Esto lo conseguiremos cuadrando el exceso de energía almacenado en verano, cuando la demanda es mínima, esta alta energía disponible la compensaremos con la alta demanda en invierno que tendremos, que, además, viene acompañada de una pequeña producción, por esto mismo es por lo que al final del mes de marzo siempre querremos haber vaciado la energía térmica que tenemos almacenada. En el siguiente gráfico tenemos podemos ver la capacidad del acumulador que almacenamos en cada mes del año.

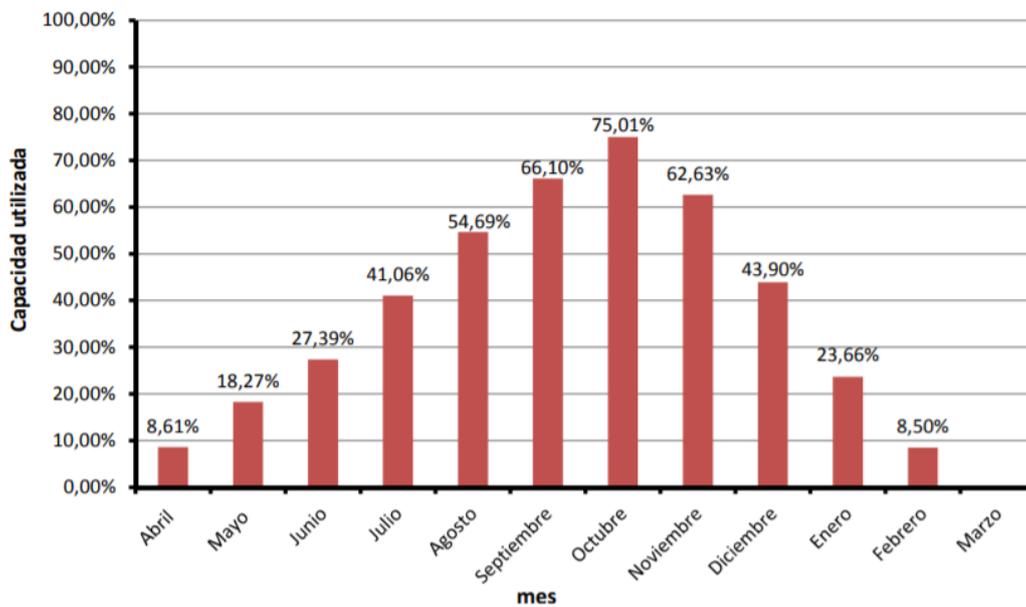


Ilustración 78 Gráfica de acumulación de energía anual

Conclusión

Tras este proyecto vemos la innovación que muchas tecnologías persiguen para aumentar la facilidad de nuestra vida gracias a las mejoras técnicas de lo que ya tenemos. En concreto esta propuesta de diseño de un sistema de calefacción por distrito es algo que precisamente en España puede tener un gran futuro, estos sistemas ya se usan en distintas partes del mundo como Dinamarca, Alemania o Japón, siendo países con ratios de irradiación solares inferiores a los de nuestro país, además, al utilizar energía renovable como fuente principal para cubrir nuestra demanda térmica conseguimos un sistema que sigue la metodología que hoy día es tan necesaria en nuestra sociedad, apostar por las energías limpias. En concreto en el caso de España, al ser un país con un clima realmente favorecedor en cuanto a la temperatura, la demanda térmica con la que nos encontramos se basa en los meses de invierno, sin tener valores medios realmente grandes, lo cual implica en sí mismo un menor espacio requerido para captar la energía y para su almacenamiento, es por eso que en este proyecto con el fin de realizar un sistema centralizado que actúe como central térmica permite que nos evitemos la instalación de los captadores y el sistema de almacenamiento unitario por cada vivienda, esto es gracias al llamado huerto solar que hemos decidido utilizar y al tanque de un mayor tamaño que hemos propuesto, este tanque coge la idea de diseños ya existentes como el de Friedrichshafen en Alemania, dónde la proposición de un tanque único mayor enterrado, permite minimizar el espacio utilizado, ya que si lo hiciéramos por vivienda tendríamos muchos almacenes de una eficiencia menor que acabarían ocupando un mayor espacio, además del ahorro económico que supone hacer una instalación entre toda una comunidad. Y aunque los materiales de cambio de fase no estén tan desarrollados en cuanto a estudios cómo el almacenamiento de calor sensible utilizando agua, se ha podido comprobar que la cantidad de energía térmica en relación al espacio que ocupan es muy superior, además de una muy alta facilidad a la hora de elegir la temperatura de diseño del sistema que nos permite mantener la balanza justa entre las restricciones de diseño del material y la eficiencia energética de nuestro propio caso. Si actualmente ya existen diseños que utilizan esta metodología, con unas características en principio inferiores simplemente por localización, a medida que avancen los materiales su incorporación en nuestro país se verá como una gran oportunidad de desarrollo.

Anexos

Anexo 1: ficha técnica del material de cambio de fase (Climsel 48).....	76 y 77
Anexo 2: ficha técnica del captador solar (CAOTEC CAO).....	78 y 79
Anexo 3: ficha de fluido transmisor (Etilenglicol).....	80-83

150610-1

ClimSel™ C48



Typically used for storing of solar or free energy, as well as for temperature protection of electronics.

Typical temperature stabilization span

48°C ↔ 53°C

118°F ↔ 127°F

Product description

ClimSel™ C48 is a salt hydrate based Phase Change Material that works by either the charging or discharging of energy at different temperatures. ClimSel™ C48 is delivered in various sizes of aluminium foil pouches. Its main components are sodium acetate, water and additives.

Physical data

Phase change temperature: Solid	48°C / 118°F
Phase change temperature: Liquid	53°C / 127°F
Latent heat of fusion (see curve)	50 Wh/kg – 180 kJ/kg
Specific gravity	1.3 kg/litre
Thermal conductivity: Solid	0.76 W/m²K
Thermal conductivity: Liquid	0.53 W/m²K

Estimated functionality time

If the products are handled correctly, and the packaging is kept uncompromised, the product will continue to cycle as intended over time, with no known lifetime limit.

Note: ClimSel™ C48 will only work as declared for as long as the pouch is intact.

Usage guidelines

- Recommended storage temperature: 10-20°C / 50-60°F.
- Preparation before use depends on application conditions.
- Handle the ClimSel™ C48 pouch with care and do not bend when solid.
- Do not use damaged pouch, as the product functionality will be compromised.

Damaged products

- If damaged pouch is suspected, it shall be thoroughly inspected before use.
- Damaged products shall be discarded and treated in accordance with federal, state and local requirements for EWC (=European Waste code) – 060314.

Climator is one of the world's leading companies within PCM and temperature stabilization solutions.

Through our know-how, PCM expertise and innovation power, we develop project-based solutions that solve our customers' temperature stabilization and control problems.

We operate within four application areas:



Climator Sweden AB
Majestätvägen 15
SE-541 34 Skövde
SWEDEN

+46 (0)500 48 23 50
www.climator.com
climator@climator.com

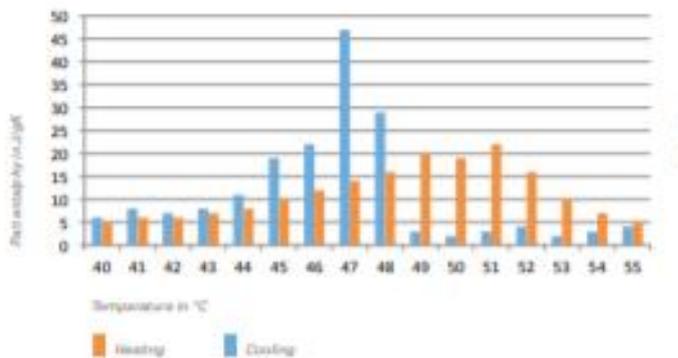
Climator
moving energy in time

150610-1

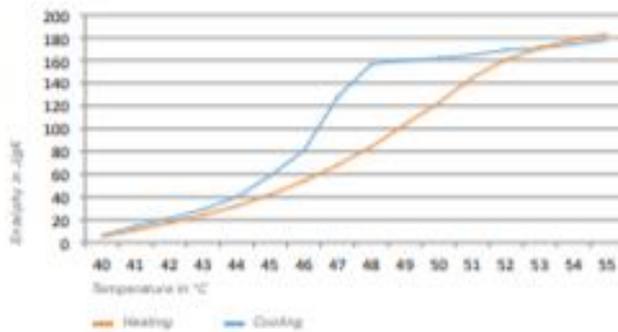
ClimSel™ C48

Phase change performance curves

Part enthalpy



Enthalpy



Orange curve shows performance during melting (to be read from left to right).
Blue curve shows performance during crystallisation (to be read from right to left).

Climator is one of the world's leading companies within PCM and temperature stabilization solutions.

Through our know-how, PCM expertise and innovation power, we develop project-based solutions that solve our customers' temperature stabilization and control problems.

We operate within four application areas:



Climator Sweden AB
Majselevägen 15
SE-641 34 Skövde
SWEDEN

+46 (0)500 48 23 50
www.climator.com
climator@climator.com

Climator
moving energy in time

Solar Collector Factsheet Caotec CAO TLP

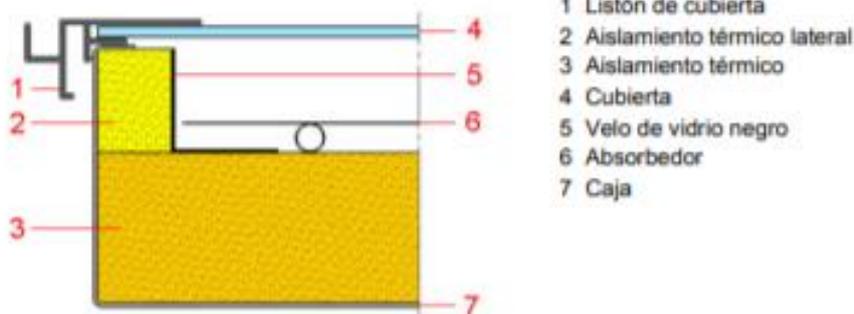


Modelo	CAO TLP
Tipo	Colector plano
Fabricante	Caotec Solar GmbH
Dirección	La Presa
	CH-7743 Brusio
Teléfono	+41 (0)81 846 55 52
Telefax	+41 (0)81 846 58 52
Email	info@caotec.ch
Internet	www.caotec.ch
Fecha de ensayo	05.2007

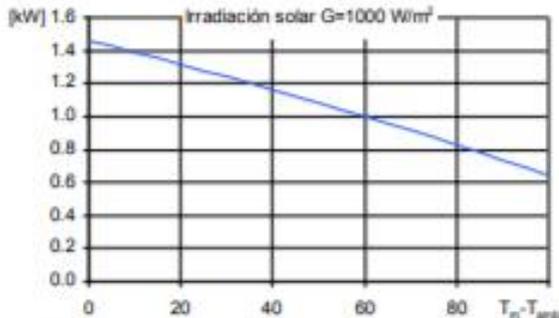
- Ensayo de rendimiento EN12975:2006
- Ensayo de durabilidad EN12975:2006

Dimensiones		Datos técnicos	
Longitud total	2.020 m	Caudal mínimo	70 l/h
Anchura total	1.037 m	Caudal nominal	110 l/h
Superficie bruta	2.095 m ²	Caudal máximo	240 l/h
Área de apertura	1.818 m ²	Contenido de fluido	1.1 l
Área de absorbedor	1.818 m ²	Presión máxima de operación	6 bar
Peso vacío	40 kg	Temperatura de estancamiento	219 °C
Montaje del captador		Informaciones adicionales	
<input checked="" type="checkbox"/> En tejado con inclinación		<input type="checkbox"/> Módulos disponibles en diversos tamaños	
<input checked="" type="checkbox"/> Integrado en tejado con inclinación		<input type="checkbox"/> Cubierta intercambiable	
<input checked="" type="checkbox"/> Sobre tejado plano con estructura		Conexiones hidráulicas	
<input type="checkbox"/> A la fachada		G3/4"	

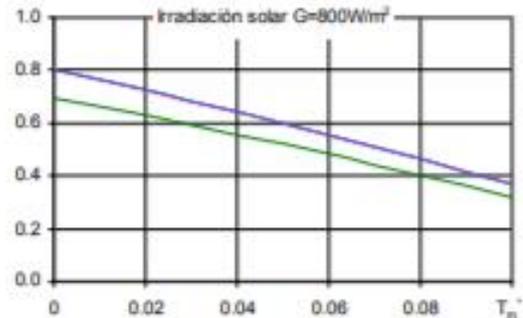
Construcción



Rendimiento máximo W_{peak}



Eficiencia relativa η

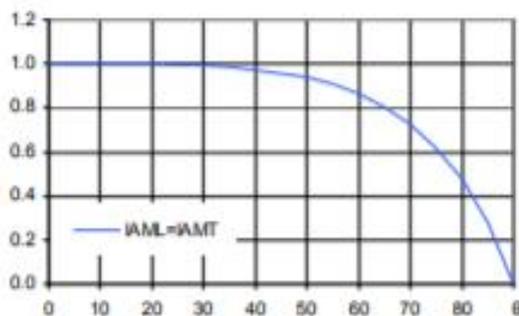


Rendimiento máximo W_{peak} 1458 W
Capacidad térmica* 5.9 kJ/K
Caudal usado para los ensayos 200 l/h
Fluido de transferencia de calor Agua-Glicol 33.3%

Área referencia	Total	Apertura	Absorbedor
η_0	0.696	0.802	0.802
a_1 [$WK^{-1}m^{-2}$]	3.30	3.80	3.80
a_2 [$WK^{-2}m^{-2}$]	0.0058	0.0067	0.0067

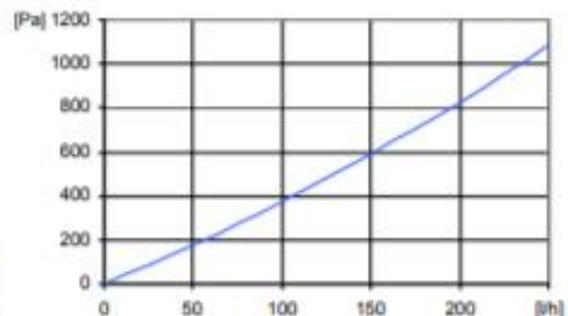
*) Capacidad térmica específica C del captador sin líquido, determinado según 6.1.6.2 del EN12975-2:2006

Modificador del ángulo IAM



K1, transversal IAM a 50° 0.94
K2, longitudinal IAM a 50° 0.94

Caída de presión Δp



Caída de presión para caudal nominal:
 $\Delta p = 416 \text{ Pa}$ ($T=20^\circ\text{C}$)

SPF Simulación de sistemas con Polysun

Breve descripción del sistema

Clima: Suiza central, orientación del captador: Sur, agua fría 10°C, agua caliente sanitaria 50°

Agua caliente sanitaria: $F_{ss}^* = 60\%$

Depósito 450 litros, inclinación del captador 45°, Necesidad diaria de energía 10 kWh (4-6 personas), Necesidad energética del sistema de referencia 4200 kWh/año

Precalentamiento del ACS: $F_{ss}^* = 25\%$

2 depósitos: 1500 litros & 2500 litros, inclinación del captador 30°, Agua caliente sanitaria 10'000 l/día (200 personas), Pérdida diaria de calor (circulación & depósito) 60 kWh, Necesidad energética del sistema de referencia 191'700 kWh/año

Calefacción de espacio: $F_{ss}^* = 25\%$

Almacenamiento combinado 1200 litros, inclinación del captador 45°, Necesidad diaria de energía 10 kWh (4-6 personas), Edificio 200 m², Construcción intermedia fuerte, bien aislada, Necesidades potencia de calentamiento 5.8 kW (temperatura exterior -8°C), Necesidades energéticas de calentamiento 12140 kWh/año, Necesidades energética del sistema referencia 16340 kWh/año

*) Fracción solar savings: Fracción de la energía final que, gracias al sistema solar, puede ser ahorrada comparada con un sistema de referencia.
 **) La necesidad en superficie y el rendimiento solar son definidos en relación a la superficie de apertura.

Superficie requerida** **Rendimiento solar****
Número de captadores

4.90 m²
 2.7 captadores 520 kWh/m²

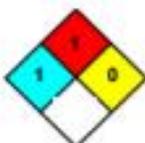
63.7 m²
 35.0 captadores 755 kWh/m²

15.3 m²
 8.4 captadores 354 kWh/m²

HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD

ETILENGLICOL

Rótulo NFPA



Rótulos UN

Fecha Revisión: 21/03/2005

SECCIÓN 1: PRODUCTO QUÍMICO E IDENTIFICACIÓN DE LA EMPRESA

Nombre del Producto: ETILENGLICOL

Sinónimos: Anticongelante; Monoetilenglicol; 1, 2-Etanodiol; Etileno dihidrato; Glicol; 1, 2-Etanodiol; 1, 2- Dihidroxietano.

Fórmula: CH₂OHCH₂OH

Número interno:

Número UN: N.R.

Clase UN:

Compañía que desarrolló la Hoja de Seguridad: Esta hoja de datos de seguridad es el producto de la recopilación de información de diferentes bases de datos desarrolladas por entidades internacionales relacionadas con el tema. La alimentación de la información fue realizada por el Consejo Colombiano de Seguridad, Carrera 20 No. 39 - 62. Teléfono (571) 2886355. Fax: (571) 2884367. Bogotá, D.C. - Colombia.

Teléfonos de Emergencia:

SECCIÓN 2: COMPOSICIÓN E INFORMACIÓN SOBRE INGREDIENTES

COMPONENTES

Componente	CAS	TWA	STEL	%
Etilenglicol	107-21-1	N.R. (ACGIH 2004)	C 100 mg/m ³ (H) (ACGIH 2004)	99-100

Uso: Usado como anticongelante, humectante, plastificante, fluido hidráulico, solvente, agente transmisor de calor en tubos refrigerantes y electrónicos, usado en la síntesis de fibras poliéster como polietilentereftalato, productos cosméticos, lacas, tintas de imprenta, para madera y para cueros.

SECCIÓN 3: IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS

VISIÓN GENERAL SOBRE LAS EMERGENCIAS:

¡Advertencia! Nocivo o fatal si se ingiere. Dañino si se inhala o absorbe a través de la piel. Puede provocar reacción alérgica de la piel. Puede causar irritación a la piel, ojos y tracto respiratorio. Afecta el sistema nervioso central.

EFFECTOS ADVERSOS POTENCIALES PARA LA SALUD:

Inhalación: La inhalación del vapor no es por lo general un problema a menos que se caliente o nebulice. La exposición a los vapores en un período largo de tiempo causa irritación de la garganta y dolor de cabeza. Puede causar náuseas, vómitos, mareos y somnolencia. Puede también ocurrir edema pulmonar y depresión del sistema nervioso central. Cuando se calienta o nebuliza, produce movimientos rápidos e involuntarios de los ojos y coma.

Ingestión: Los síntomas iniciales de dosis masivas asemejan la intoxicación con alcohol, pasando a depresión del SNC, vómitos, dolor de cabeza, frecuencia respiratoria y cardíaca rápida, presión sanguínea disminuida, estupor, colapso e inconsciencia con convulsiones. La muerte puede seguir por falla respiratoria o paro cardiovascular. La dosis letal en humanos: 100 ml.

Piel: Puede ocurrir una ligera irritación y penetración en la piel.

ETILENGLICOL
CISPROQUIM 1

Ojos:	Las salpicaduras pueden causar irritación, dolor, daño ocular.
Efectos crónicos:	Voluntarios expuestos a aproximadamente 30 mg/m ³ (12 ppm), 22 h/día por 28 días experimentaron únicamente moderada irritación en la garganta, ligero dolor de cabeza y débil dolor de espalda. Trabajadores expuestos al vapor y neblina del Etilenglicol calentado alrededor de 100°C experimentaron frecuentes ataques de inconsciencia y disturbios visuales. El producto contenía 40% Etilenglicol, 55% ácido bórico y 5% de amonio. En estudio con animales indicó que ingestión repetida causa la formación de cálculos en la vejiga y daño en el riñón. Se reportaron casos de sensibilización de la piel en gente ocupacionalmente expuesta a este químico durante el pulimento y corte de lentes de vidrio.

SECCIÓN 4: PROCEDIMIENTOS DE PRIMEROS AUXILIOS

Inhalación:	Trasladar al aire fresco. Si no respira administrar respiración artificial. Si respira con dificultad suministrar oxígeno. Mantener la víctima abrigada y en reposo. Buscar atención médica inmediatamente.
Ingestión:	Lavar la boca con agua. Si está consciente, suministrar abundante agua. No inducir el vómito. Buscar atención médica inmediatamente.
Piel:	Retirar la ropa y calzado contaminados. Lavar la zona afectada con abundante agua y jabón, mínimo durante 15 minutos. Si la irritación persiste repetir el lavado. Buscar atención médica.
Ojos:	Lavar con abundante agua, mínimo durante 15 minutos. Levantar y separar los párpados para asegurar la remoción del químico. Si la irritación persiste repetir el lavado. Buscar atención médica.
Nota para los médicos:	Después de proporcionar los primeros auxilios, es indispensable la comunicación directa con un médico especialista en toxicología, que brinde información para el manejo médico de la persona afectada, con base en su estado, los síntomas existentes y las características de la sustancia química con la cual se tuvo contacto.

SECCIÓN 5: MEDIDAS EN CASO DE INCENDIO

Punto de inflamación (°C):	111 c.c.
Temperatura de autoignición (°C):	398
Limites de inflamabilidad (%VV):	3.2 - 15.3
Peligros de incendio y/o explosión:	Peligro de incendio leve a moderado cuando se expone al calor o las llamas. Puede formar mezclas explosivas con el aire a temperaturas por encima del punto de ignición. Los contenedores pueden explotar al calentarse. A temperatura mayor de 100 °C el vapor se oxida formando ácidos en el ambiente. Los vapores son más pesados que el aire y pueden viajar grandes distancias y acumularse en áreas confinadas.
Medios de extinción:	Espuma tipo alcohol, dióxido de carbono, polvo químico seco. El agua o la espuma pueden causar espumación. Se recomienda el agua en forma de rocío para refrigerar los contenedores.
Productos de la combustión:	Monóxido de carbono, dióxido de carbono.
Precauciones para evitar incendio y/o explosión:	Evitar el calentamiento excesivo. Mantener los recipientes bien cerrados. Conectar a tierra los recipientes para evitar descargas electrostáticas.
Instrucciones para combatir el fuego:	Evacuar o aislar el área de peligro. Eliminar toda fuente de ignición. Restringir el acceso a personas innecesarias y sin la debida protección. Ubicarse a favor del viento. Usar equipo de protección personal. Retirar los contenedores si no hay riesgo. Mantenerlos refrigerados con agua en forma de rocío desde una distancia segura. Alejarse del área.

SECCIÓN 6: MEDIDAS EN CASO DE VERTIDO ACCIDENTAL

Evacuar o aislar el área de peligro. Eliminar toda fuente de ignición. Restringir el acceso a personas innecesarias y sin la debida protección. Ubicarse a favor del viento. Usar equipo de protección personal. Ventilar el área. No permitir que caiga en fuentes de agua y alcantarillas. Absorber con tierra u otro material no combustible y disponer en contenedores limpios, secos y con cierre hermético. Construir diques para prevenir la contaminación. Limpiar con agua los residuos remanentes.

ETILENGLICOL
CISPROQUIM 2

SECCIÓN 7: MANEJO Y ALMACENAMIENTO

Manejo:	Evitar la generación de polvo. Usar siempre protección personal así sea corta la exposición o la actividad que realice con el producto. Mantener estrictas normas de higiene, no fumar, ni comer en el sitio de trabajo. Usar las menores cantidades posibles. Conocer en donde está el equipo para la atención de emergencias. Leer las instrucciones de la etiqueta antes de usar el producto. Rotular los recipientes adecuadamente. Evitar el daño físico en los contenedores.
Almacenamiento:	Lugares ventilados, frescos y secos. Lejos de fuentes de calor e ignición (y de la acción directa de los rayos solares). Separado de materiales incompatibles. Rotule los recipientes adecuadamente. Limite la cantidad de material en almacenamiento, alejado de combustibles y oxidantes, a temperatura ambiente. Contenedores de acero cubiertos con resina, de aluminio o de acero inoxidable, deben permanecer cerrados y debidamente etiquetados. Conecte a tierra los recipientes para evitar descargas electrostáticas. Los equipos eléctricos, de iluminación y ventilación deben ser a prueba de explosiones.

SECCIÓN 8: CONTROLES DE EXPOSICIÓN Y PROTECCIÓN PERSONAL

Controles de ingeniería:	Ventilación local y general, para asegurar que la concentración no exceda los límites de exposición ocupacional. Debe disponerse de duchas y estaciones lavaojos.
---------------------------------	---

EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL

Protección de los ojos y rostro:	Utilizar gafas protectoras contra productos químicos.
Protección de piel:	Usar guantes protectores de caucho y ropa limpia para cubrir el cuerpo.
Protección respiratoria:	Respirador con filtro para vapores orgánicos.
Protección en caso de emergencia:	Equipo de respiración autocontenido (SCBA) y ropa de protección TOTAL.

SECCIÓN 9: PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Apariencia, olor y estado físico:	Líquido viscoso, incoloro y casi inodoro. De olor suave, sabor ligeramente dulce.
Gravedad específica (Agua=1):	1.10 / 20°C
Punto de ebullición (°C):	197.6 a 760 mmHg
Punto de fusión (°C):	-13
Densidad relativa del vapor (Aire=1):	2.14
Presión de vapor (mm Hg):	0.05 / 20°C
Viscosidad (cp):	21 a 20 °C.
pH:	Neutro.
Solubilidad:	Soluble en agua, alcoholes alifáticos y acetona. Poco solubilidad en benceno, tolueno, diclorometano y cloroformo.

SECCIÓN 10: ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

Estabilidad química:	Estable bajo condiciones normales de almacenamiento y manipulación. No se polimeriza. Es higroscópico.
Condiciones a evitar:	Calor, llamas, fuentes de ignición, agua (absorbe rápidamente) e incompatibles.
Incompatibilidad con otros materiales:	Agentes oxidantes fuertes. Reacciona violentamente con ácido clorosulfónico, oleum, ácido sulfúrico, ácido perclórico. Produce ignición a temperatura ambiente con trióxido de Cromo, permanganato de potasio y peróxido de sodio. Produce ignición a 100 °C con dicromato amónico, clorato de plata, cloruro de sodio y nitrato de uranio.
Productos de descomposición peligrosos:	Cuando se calienta hasta la descomposición puede formar dióxido y monóxido de carbono. Puede producir humos acres y vapores irritantes cuando se calienta hasta la descomposición.
Polimerización peligrosa:	No ocurrirá.

SECCIÓN 11: INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

DL50 (oral, rata): 4700 mg/Kg.

DL50 (oral, ratón)=14600 mg/Kg.
DL50 (oral, conejo)= 5000 mg/Kg.
DL50 (oral, conejillo de indias)= 8200 mg/Kg.
DL50 (oral, perro)= Mayor a 8810 mg/Kg.
DL50 (intraperitoneal, ratón)=5800 mg/Kg.
DL50 (subcutánea, piel)=10000 mg/Kg.

Toxicidad apreciable. Irritante. La ingestión causa desórdenes del sistema nervioso. Por intoxicación crónica daña gravemente los riñones y el cerebro. Dosis letal humanos: 100ml. Puede causar efectos teratogénicos. Es clasificado como no cancerígeno por IARC y NTP.

SECCIÓN 12: INFORMACIÓN ECOLÓGICA

Toxicidad peces:

CL50 > 100 ppm/48 h/Shrimp/Agua salada. Toxicidad acuática = 100-1000/96h/agua fresca. DBO5= 16-68%

Cuando se elimina en el suelo, se espera que este material se biodegrade rápidamente. Cuando se elimina en el suelo, se espera que este material se filtre en las aguas subterráneas. No se espera que este material se evapore significativamente cuando se elimina en el suelo. Cuando se elimina en el agua, se espera que este material se biodegrade rápidamente. Cuando se elimina en el agua, se espera que este material tenga una vida media entre 1 y 10 días. No se espera que este material se bioacumule significativamente. Este material tiene un coeficiente logarítmico de repartición octanol-agua inferior a 3.0. No se espera que este material se evapore significativamente cuando se elimina en el agua. Cuando se elimina en el aire, se espera que este material se degrade rápidamente por la reacción con los radicales hidroxílicos producidos fotoquímicamente. Cuando se elimina en el aire, se espera que este material tenga una vida media entre 1 y 10 días.

SECCIÓN 13: CONSIDERACIONES DE DISPOSICIÓN

Debe tenerse presente la legislación ambiental local vigente relacionada con la disposición de residuos para su adecuada eliminación.

SECCIÓN 14: INFORMACIÓN SOBRE TRANSPORTE

No está clasificado y regulado para el transporte de materiales peligrosos.

SECCIÓN 15: INFORMACIÓN REGLAMENTARIA

1. Ley 769/2002. Código Nacional de Tránsito Terrestre. Artículo 32: La carga de un vehículo debe estar debidamente empacada, rotulada, embalada y cubierta conforme a la normatividad técnica nacional.

2. Ministerio de Transporte. Resolución número 3800 del 11 de diciembre de 1998. Por el cual se adopta el diseño y se establecen los mecanismos de distribución del formato único del manifiesto de carga.

3. Los residuos de esta sustancia están considerados en: Ministerio de Salud. Resolución 2309 de 1986, por la cual se hace necesario dictar normas especiales complementarias para la cumplida ejecución de las leyes que regulan los residuos sólidos y concretamente lo referente a residuos especiales.

SECCIÓN 16: OTRAS INFORMACIONES

La información relacionada con este producto puede no ser válida si éste es usado en combinación con otros materiales o en otros procesos. Es responsabilidad del usuario la interpretación y aplicación de esta información para su uso particular.

Bibliografía

Bibliografía

Libros

- I. Cañada Ribera, Javier. *Manual de energía solar térmica: diseño y cálculo de instalaciones*. Valencia: Valencia: Editorial UPV, D.L. 2008., 2008.
- II. Dell, Ronald. *Understanding batteries [electronic resource]*. Cambridge: Cambridge: Royal Society of Chemistry, c2001., 2001.
- III. Duffie, J.A., y W.A. Beckman. *Solar Engineering of Thermal Processes: Fourth Edition*, 2013. <https://doi.org/10.1002/9781118671603>.
- IV. Garvey, S.D., y A. Pimm. *Compressed Air Energy Storage*, 2016. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803440-8.00005-1>.

Publicaciones

- I. Código Técnico de Edificación. Documento Básico HE. 2006
- II. Guía Técnica de Instalaciones Solares Térmicas por Gas Natural

Internet

- I. Ingeoexpert, Redacción. «¿Cómo funciona una central hidroeléctrica?» *Ingeoexpert* (blog), 22 de marzo de 2018. <https://ingeoexpert.com/como-funciona-una-central-hidroelectrica/>.
- II. Kularatna, Nihal. *Energy storage devices for electronic systems: rechargeable batteries and supercapacitors*. First edition. Rechargeable batteries and supercapacitors. London, England : Academic Press, 2015., 2015.
- III. «La sal como almacén de energía eléctrica», 10 de noviembre de 2009. <https://gstriatum.com/2009/11/10/la-sal-como-almacen-de-energia-electrica/>.
- IV. «Molten Salt Storage». Accedido 25 de mayo de 2019. <http://large.stanford.edu/courses/2015/ph240/dodaro2/>.
- V. «Pila Volta». Accedido 10 de junio de 2019. http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es/FISICA/document/fisicaInteractiva/sacaleE_M2/Volta/Pila_Volta.htm.