

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de la Energía

Almacenamiento Térmico en Hormigón para la
Descarbonización de Calor de Procesos

Autor: Juan Jesús Plaza Pérez

Tutora: Cristina Prieto Ríos

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

Sevilla, 2022



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de la Energía

Almacenamiento Térmico en Hormigón para la Descarbonización de Calor de Procesos

Autor:

Juan Jesús Plaza Pérez

Tutora:

Cristina Prieto Ríos

Profesora Ayudante Doctor

Dpto. Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2022

Trabajo Fin de Grado: Almacenamiento Térmico en Hormigón para la Descarbonización de Calor de Procesos

Autor: Juan Jesús Plaza Pérez

Tutora: Cristina Prietos Ríos

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2022

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a todos aquellos que me han ayudado y apoyado a lo largo de esta etapa que no ha sido nada fácil, en especial a mi madre Isabel, mi padre Juan, mi hermana María y mi abuela Isabel que siempre han estado ahí cuando lo he necesitado, además no me olvido de todos aquellos que me quieren y apoyan a diario y de mis abuelos que ya no están pero que me apoyaban en todo momento.

En segundo lugar, agradecer a la Universidad de Málaga y Universidad de Sevilla y a todos los profesores de los que he tenido la oportunidad de aprender muchísimo.

Juan Jesús Plaza Pérez

Sevilla, 2022

Resumen

En este Trabajo de Fin de Grado se estudiará un sistema de almacenamiento basado en un material económico como es el hormigón. Principalmente se centra en un sistema de almacenamiento ubicado en centrales térmicas. Se expone como esta tecnología favorece a la descarbonización industrial, una cuestión que se encuentra en el punto de mira de los 196 países que componen el Acuerdo de París.

En primer lugar, se presentará un análisis teórico de las diferentes tecnologías de almacenamiento presentes en la actualidad.

Posteriormente se expondrá los diferentes tipos de almacenamiento térmico existentes.

Por último, se explicarán los diferentes tipos de materiales usados en sistemas de almacenamiento térmico en hormigón y el papel que tiene esta tecnología en las aplicaciones industriales.

Abstract

In this Final Degree Project, a storage system based on an economical material such as concrete will be studied. It mainly focuses on a concrete storage system located in thermal power plants. It is exposed how this technology favors industrial decarbonization, an issue that is in the spotlight of the 196 countries that make up the Paris Agreement.

First, a theoretical analysis of the different storage technologies present today will be presented.

Subsequently, the different types of thermal storage existing today will be exposed.

Finally, the different types of materials used in concrete thermal storage systems and the role of this technology in industrial applications will be explained.

Índice

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Abstract	xi
Índice	xii
Índice de Tablas	xiv
Índice de Figuras	xv
Índice de ecuaciones	xvii
Notación	xviii
1 Introducción	1
1.1. <i>Transición energética.</i>	2
1.1.1 Reforma del comercio de emisiones.	3
1.1.2 Inversión en transición energética.	3
1.1.3 Reducción de emisiones en infraestructuras.	3
1.1.4 Reducción de emisiones de carbón.	3
1.1.5 Porcentaje de energía verde.	3
1.1.6 Reducción de emisiones de CO2 de vehículos.	3
1.1.7 Alternativas sostenibles para transporte aéreo y marítimo.	4
1.2. <i>Sistemas de almacenamiento actuales.</i>	4
1.2.1. Bombeo Hidroeléctrico.	5
1.2.2. Almacenamiento térmico.	5
1.2.3. Aire comprimido.	7
1.2.4. Volantes de inercia.	8
1.2.5. Baterías.	9
1.2.6. Sistemas de Almacenamiento basado en Supercondensadores.	10
2 Tipos de almacenamiento térmico	11
2.1. <i>Selección del método de almacenamiento.</i>	11
2.2. <i>Sistemas de almacenamiento de calor sensible.</i>	12
2.2.1. Almacenamiento líquido.	13
2.2.2. Almacenamiento en medios sólidos.	14
2.3. <i>Sistemas de almacenamiento de calor latente.</i>	15
2.3.1. Materiales de cambio de fase orgánicos.	17
2.3.2. Materiales de cambio de fase inorgánicos.	17
2.3.3. Eutéctico.	17
2.4. <i>Sistemas de almacenamiento termoquímico.</i>	17
2.4.1. Proceso de carga en un Sistema termoquímico.	18
2.4.2. Almacenamiento.	18
2.4.3. Descarga.	19
3 Sistema de almacenamiento en hormigón	20
3.1. <i>Modelo</i>	20
3.1.1 Material del intercambiador de calor.	21

3.1.2	Análisis de transferencia de calor en una estructura de hormigón empotrada en tuberías.	22
3.2.	<i>Hormigón como material de almacenamiento.</i>	25
3.3.	<i>Composición del hormigón.</i>	25
3.4.	<i>Propiedades del Sistema de almacenamiento según el hormigón utilizado.</i>	26
3.4.1.	Hormigón reforzado con fibras de nylon.	27
3.4.2.	Cemento a base de aluminato de calcio.	30
3.4.3.	Adiciones recicladas.	32
3.4.4.	Heatcrete	36
3.4.5.	HEATEK.	37
3.5.	<i>Estudio comparativo de diferentes mezclas para alta temperatura.</i>	41
3.5.1.	Comparación de hormigón geopolimérico y diferentes porcentajes de agregados plásticos.	45
3.5.2.	Conclusión del estudio comparativo.	48
3.6.	<i>Conclusión.</i>	48
4	La industria y los sistemas de almacenamiento de energía térmica en hormigón	51
4.1	<i>EnergyNest.</i>	51
4.1.1	Proyecto Masdar.	52
4.2	<i>CADE, SolidTES y proyecto EDITOR.</i>	57
4.2.1	Proyecto EDITOR.	58
4.3	<i>Proyecto WESPE.</i>	61
4.3.1	Distribución y funcionamiento.	62
4.4	<i>Proyecto Polyphem.</i>	64
4.5	<i>Conclusión.</i>	67
5	Conclusión.	69
	Referencias	11
	Índice de Conceptos	15
	Glosario	16

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Parámetros de caracterización de materiales sensibles y latentes. [15]	6
Tabla 2: Parámetros de caracterización de materiales termoquímicos. [15]	7
Tabla 3: Datos publicados sobre posibles materiales de almacenamiento de calor sensible [22]	12
Tabla 4: Características principales de los materiales de Calor Sensible [28]	14
Tabla 5: Principales características de materiales sólidos. [28]	15
Tabla 6: Datos termo-físicas de algunos materiales de cambio de fase [26]	16
Tabla 7: Materiales para el almacenamiento termoquímico. [26]	18
Tabla 8: Propiedades del hormigón como sistema de almacenamiento, para alta temperatura. [28]	25
Tabla 9: Proporción de Nylon [38]	27
Tabla 10: Componentes químicos CAC, BFS. [37]	31
Tabla 11: Hormigones etiqueta A y B [39]	32
Tabla 12: Características hormigones tipo A [39]	33
Tabla 13: Conductividad muestras. [39]	34
Tabla 14: Resumen propiedades Tipo A y B. [39]	35
Tabla 15: Propiedades Heatcrete [40]	36
Tabla 16: Principales características de los materiales HEATEK-AC; HEATEK-RC y HEATEK-RV [44]	37
Tabla 17: Densidad y calor específico HEATEK-AC. [43]	37
Tabla 18: Resistencia a la compresión del material HEATEK AC. [43]	38
Tabla 19: Principales características HEATEK-AC. [43]	38
Tabla 20: Densidad y características mecánicas de las muestras. [42]	40
Tabla 21: Capacidad calorífica (kJ/kg·K) [42]	40
Tabla 22: Resultados de la conductividad térmica W/m·K. [42]	40
Tabla 23: Materiales de almacenamiento a estudiar. [45]	41
Tabla 24: Resultados experimentales para V constante. [45]	43
Tabla 25: Resultados principales para Q_{nom} constante. [45]	44
Tabla 26: Proporción de mezcla. [45]	45
Tabla 27: Propiedades térmicas materiales a estudiar. [45]	46
Tabla 28: Características principales nuevos materiales. [45]	47
Tabla 29: Planificación entre semana. [52]	58
Tabla 30: Resumen de resultados para las tres propuestas de ladrillos. [44]	67
Tabla 31: Comportamiento térmico de las diferentes configuraciones. [44]	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 : Transición a un nuevo modelo energético. [5]	2
Figura 2: Almacenamiento Energetico. [11]	4
Figura 3: Funcionamiento de una Central Hidroeléctrica de Bombeo. [12]	5
Figura 4: Cambio de fase, almacenamiento de calor latente. [60]	6
Figura 5: "Batería" de Aire Comprimido. [16]	7
Figura 6: Partes del volante de inercia [19]	8
Figura 7: Electrolisis [56]	9
Figura 8: El mercado de baterías [57]	10
Figura 9: Módulo típico de almacenamiento de calor sensible en medio sólido. [32]	20
Figura 10: Seccion transversal modelo de almacenamiento sólido. [32]	20
Figura 11: Unidad de almacenamiento de calor cilíndrico. [32]	21
Figura 12: Esquema del modelo a estudiar. [34]	22
Figura 13: Aplicación del modelo propuesto. [34]	23
Figura 14: Aplicación del modelo propuesto. [35]	23
Figura 15: Ejemplo de termocilado del modulo de ensayo. [35]	24
Figura 16: Ejemplo de termociclado del módulo de ensayo más detallado. [35]	24
Figura 17: Curva de carga CTOD [38]	28
Figura 18: Calor específico frente a la muestra FC y C [38]	29
Figura 19: Variación de masa bajo tratamiento térmico. [38]	29
Figura 20: Muestras de FC tratadas a diferentes temperaturas. [38]	30
Figura 21: Cemento de aluminato de calcio [37]	31
Figura 22: Calor específico frente a temperatura a) primer escaneo b) segundo escaneo	33
Figura 23: C (a), FC (b), CRA (c) y FCRA (d) [39]	34
Figura 24: CL (a), SFCL (b), FPCL (c) y FSCL (d) [39]	35
Figura 25: Pérdida de masa del material Heatcrete. [40]	36
Figura 26: Ensayo HEATEK-AC. [43]	39
Figura 27: Ensayo HEATEK-RC primer ciclo. [42]	39
Figura 28: Comparación de mezclas a estudiar. [45]	42
Figura 29: Temperaturas alcanzadas por las 5 mezclas transcurridos 3600 s a V_{tot} constante. [45]	42
Figura 30: Mapa de contorno fase de carga (izquierda) y descarga (derecha) a V_{tot} constante. [45]	43
Figura 31: Perfil de temperatura para Q_{nom} constante. [45]	44
Figura 32: Mapa de contorno de temperatura para Q_{nom} constante, Carga (derecha), Descarga (Izquierda) [45]	45
Figura 33: Propiedades térmicas de los materiales. [45]	46

Figura 34: Perfil de temperatura a V constante. [45]	47
Figura 35: Mapa de contorno, fase de carga (derecha), fase de descarga (izquierda). [45]	48
Figura 36: Diseño elemento térmico EnergyNest. [49]	51
Figura 37: Elementos principales del sistema de almacenamiento térmico de EnergyNest. [48]	52
Figura 38: Diagrama simplificado del bucle. [49]	53
Figura 39: Esquema de aislamiento del sistema de energía eléctrica (Izquierda), fotografía del prototipo EnergyNest (Derecha). [48] [49]	53
Figura 40: Medicion de la temperatura y el caudal masico durante 4 dias. [49]	54
Figura 41: Temperaturas internas durante el periodo de 4 dias. [49]	54
Figura 42: Potencia y energía calculadas. [49]	55
Figura 43: Comparación de perfiles de temperatura. (Líneas continuas simulaciones y círculos perfil del prototipo). [49]	55
Figura 44: Comparacion del rendimiento del sistema de almacenamiento termico. [49]	56
Figura 45: Muestras del estudio realizado. [49]	56
Figura 46: Esquema de la instalación. [51]	57
Figura 47: Sistema de almacenamiento SolidTES. [51]	58
Figura 48: Balance de energía para un solo elemento acumulador. [53]	59
Figura 49: Modo de operación el 30 de julio de 2019. [53]	60
Figura 50: Almacenamiento de carga, parada y descarga durante 1 semana. [53]	60
Figura 51: Capacidad calorífica específica. [53]	61
Figura 52: Propiedades de los materiales utilizados. [46]	61
Figura 53: Corte TES hormigón (izquierda) y cerámica moldeable (derecha). [46]	62
Figura 54: Esquema del proyecto. [46]	62
Figura 55: Ciclado del módulo cerámico. [46]	63
Figura 56: Curvas de carga y descarga, almacenamiento y caudal másico. [46]	63
Figura 57: Calentamiento en paralelo de M1 y M2. [46]	64
Figura 58: Esquema de la planta. [61]	64
Figura 59: Ladrillos macizos. [44]	65
Figura 60: Patrones geometricos. Izquierda vista lateral y superior de las capas, derecha vista isométrica. [44]	66
Figura 61: Medidas ladrillo comercial; Ladrillo hueco de hormigón Heatek-RV; Medidas ladrillo hueco Heatek-RV. [44]	66

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Energía térmica almacena por calor sensible.	12
Ecuación 2: Sistema de almacenamiento de calor sensible.	16
Ecuación 3: Sistema de almacenamiento termoquímico.	18
Ecuación 4: Geometría de la unidad de almacenamiento. [32]	21

Notación

C_p	Capacidad calorífica específica
m	Masa
Q	Calor
ΔT	Diferencia de temperatura
k	Conductividad térmica
C	Capacidad calorífica específica
C_{vol}	Capacidad calorífica volumétrica
T	Temperatura
t	Tiempo
η	Eficiencia
α	Difusividad térmica
ρ	Densidad
HTF	Fluido de transferencia de calor
Re	Numero de Reynolds
CV	Convección
TES	Sistema de almacenamiento térmico
CD	Conducción
stg	Almacenamiento
eff	Efectiva
$^{\circ}C$	Grados Celsius
$^{\circ}K$	Grados Kelvin
L	Calor latente de fusión.
H	Entalpía
:	Tal que
<	Menor
>	Mayor
\Leftrightarrow	Si y sólo si

1 INTRODUCCIÓN

El Acuerdo de París solicita una transformación económica y social apoyándose en la mejor ciencia disponible.

La descarbonización industrial se encuentra en el punto de mira de los 196 países que la componen, a finales del 2015 en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, se establecieron como objetivo la reducción del 40% de las emisiones de gases de efecto invernadero en el año 2030 [1]. Esta medida se debe principalmente al aumento de la temperatura mundial, según datos de la NASA la Tierra en 2021 estuvo 1.1 °C más caliente que el promedio a finales del siglo XIX, siglo conocido como el inicio de la revolución industrial [2]. El objetivo principal es alcanzar en el año 2050 cero emisiones netas por medio de una transición energética. Es por ello que hay que examinar e investigar nuevas tecnologías que ayuden en el cumplimiento de este objetivo.

Según el Instituto Nacional de Estadística, en España hay un total de 192.400 empresas. El 88% pertenecen al sector manufacturero [1], sector que demanda grandes cantidades de energía. La inexistencia de sistemas de almacenamiento de energía a gran escala, conlleva a que la mayor parte de esa energía proceda de fuentes no renovables. Este trabajo se centra en una nueva tecnología como es el almacenamiento térmico en hormigón, sirviendo de apoyo a las energías renovables.

Esta tecnología es usada principalmente en centrales de Energía Termosolar, tecnología de generación de energía a partir de la radiación solar. Principalmente la radiación solar calienta un fluido, hasta que este alcanza un nivel termodinámico capaz de generar la potencia suficiente para mover un alternador.

Existen varios tipos de centrales termosolares, expuestos en los siguientes puntos con un breve resumen de su funcionamiento [3].

- Central termosolar de cilindros parabólicos: Tecnología que usa espejos cóncavos montados en forma de canal parabólico por cuyo eje transcurre un receptor con el fluido caloportador. Este fluido absorbe la radiación del sol aportada por el reflejo de los rayos del sol y esta energía transmitida al fluido es transportada hacia un intercambiador donde cederá energía térmica para su transformación en energía eléctrica o se almacenará para un uso posterior.
- Central termosolar de heliostatos con receptor central de torre: El funcionamiento de esta central consiste en la distribución de heliostatos que se definen como espejos de amplia superficie ensamblados en una estructura, estos tienen la capacidad de girar en doble eje para permitir seguimiento en azimut y elevación. El objetivo viene siendo el mismo que la anterior tecnología, consiste en captar los rayos solares siguiendo la trayectoria del sol y reflejándolos en un punto específico, concretamente en la torre, donde se sumaran todos los rayos aportados por los diferentes heliostatos que forman el campo solar. Debido a esta concentración se conseguirá una alta temperatura del fluido caloportador que se encuentra en ese punto.
- Central termosolar con reflectores lineales Fresnel: Consiste en el montaje de espejos planos sobre una estructura, en el suelo, donde se puede realizar el giro del eje del espejo siguiendo la trayectoria del sol y se focaliza la captación sobre el conducto que contiene el fluido caloportador, situado fijo a cierta altura.
- Central termosolar con discos parabólicos de Stirling: Esta tecnología está compuesta por concentradores parabólicos independientes, formados por un motor térmico de combustión externa que se encuentra en el foco, este motor transforma la energía térmica recibida en un giro mecánico y posteriormente transformada en energía eléctrica, gracias al generador eléctrico que forma el motor Stirling.

Además, diferentes industrias acuden a esta tecnología, como es el caso la industria del gas para almacenamiento de GNL, hidrogeno y otros líquidos.

El almacenamiento de grandes cantidades de hidrógeno se realiza a alta presión, este sistema de almacenamiento se compone de una cubierta de acero interior y una cubierta exterior de hormigón. El 50% de las fuerzas longitudinales la soporta el acero y el resto de las cargas circunferenciales la soporta una lámina de hormigón armado.

El Gas Natural Licuado se debe mantener en forma líquida y a baja temperatura en un depósito. Esta tecnología está compuesta por un recipiente interno donde se contiene el gas licuado a temperatura criogénica y aislado del exterior a través de un aislamiento para evitar fugas. Este se rodea por un contenedor que presenta características adecuadas, tanto mecánicas como de estanqueidad. En este punto el hormigón y el acero presentan un papel fundamental, haciendo de aislante y evitando una transferencia de calor con el exterior, disminuyendo de este modo la evaporación. El acero actúa como una barrera impermeable al gas licuado y se utiliza para revestir tanto el recipiente interno como el externo. [4]

En este caso como ya mencionamos nos centraremos en la combinación de diferentes tecnologías con el fin de almacenar energía térmica para utilizarla en otro momento, resolviendo de este modo el problema de la intermitencia de la luz solar. Este sistema se carga durante las horas que hay radiación solar y se descarga durante la noche, ayudando a solucionar el desajuste que existe.

1.1. Transición energética.

En la actualidad estamos viviendo una transición energética, esto conlleva un conjunto de cambios en los modelos de producción, distribución y consumo de energía para hacerlos más sostenibles. El objetivo principal es la sustitución del sistema energético basado en los combustibles fósiles en un sistema energético basado en las energías renovables. [5]

El uso de estas energías no renovables es la principal causa del cambio climático, debido a la alta emisión de dióxido de carbono, además son materiales que una vez consumidos solo pueden regenerarse en un largo periodo de tiempo. [5]

Se puede notar esta transición en los precios tan elevados del recibo de la luz, donde Europa penaliza con un impuesto las emisiones de CO₂, con esto se intenta a utilizar energía lo menos contaminante posible, debido a que su coste es inferior. [6] No solo se busca reducir las emisiones, sino también transformar la economía y la sociedad para promover un crecimiento económico más sostenible.



Figura 1 : Transición a un nuevo modelo energético. [5]

El objetivo principal es que el 40% de la energía de los países de la UE deberán ser renovables para el año 2030. “Las energías renovables son una fuente de energía intermitente, por ello el uso del gas u otros combustibles

fósiles serán necesarios para satisfacer la demanda de un sistema de energía eléctrica.” Es cierto, que las energías renovables no están continuamente disponibles para su conversión en electricidad, pero existen diferentes métodos de almacenamiento. [7]

En los siguientes puntos se exponen las reformas más relevantes que se están llevando a cabo para lograr los objetivos mencionados.

1.1.1 Reforma del comercio de emisiones.

El Régimen de Comercio de Derechos de Emisión (ETS) de la Unión Europea establece el límite máximo de cantidad de CO₂ que se pueden emitir a través de las industrias pesadas y las centrales eléctricas. Este volumen total de emisiones autorizadas se distribuye en las empresas en forma de permiso que pueden comercializarse.

Cada año este límite se reduce y de este modo el coste de la tonelada de CO₂ aumenta. Con esta reforma se ha conseguido reducir en los últimos 16 años un 42.8% las emisiones de la generación de electricidad y de las industrias de alto consumo energético. [8]

1.1.2 Inversión en transición energética.

Para completar los gastos de esta transición energética, se incita a los Estados miembros a destinar la totalidad de los ingresos obtenidos por el comercio de derechos de emisión a proyectos que se relacionen con la transición energética. Esta normativa determina que un porcentaje específico de ingresos del sistema nuevo de transporte por carretera y edificios debe abordar el posible impacto social en los hogares vulnerables, la microempresas y los usuarios del transporte. [7]

1.1.3 Reducción de emisiones en infraestructuras.

La Ley de Reparto del Esfuerzo asigna a cada Estado miembro objetivos que cumplir en cuanto a emisiones en el ámbito de los edificios, transporte marítimo, transporte por carretera, gestión de residuos, agricultura y la pequeña industria. Estos objetivos se basan en las capacidades económicas y PIB per cápita de cada país. [7]

1.1.4 Reducción de emisiones de carbón.

Se insta a los Estados miembros a la ampliación de bosques y sumideros naturales de carbono, además de una buena conservación de los ya existentes. Para esto se ha modificado la Ley sobre el uso del suelo, Silvicultura y Agricultura.

El objetivo es alcanzar la neutralidad climática en los sectores del uso de la tierra, la silvicultura y la agricultura para el 2035. Se ha desarrollado una Estrategia Forestal con el fin de conseguir un total de 3.000 millones de árboles nuevos en toda Europa para el 2030. [7]

1.1.5 Porcentaje de energía verde.

El 40% de la energía deberá ser renovable para el año 2030.

En esta propuesta la Comisión incita alinear las normas para la eficiencia energética de los edificios con el Pacto Verde Europeo, se conseguirá que todos los edificios públicos nuevos sean de emisión 0. Además, de una renovación del 3% del parque de edificios públicos para mejorar la eficiencia energética. [7]

1.1.6 Reducción de emisiones de CO₂ de vehículos.

Se exige la reducción de emisiones de CO₂ de la media del parque de vehículos de la UE, que procedan de turismos y furgonetas nuevos.

La reducción es de un 15% para el periodo 2025-2029 y un 37.5% para turismos nuevos y un 31% para furgonetas nuevas a partir de 2030. [9]

Se establece su desaparición del mercado en el año 2035, para esta fecha todos los turismos y furgonetas deben ser libres de emisiones. [7]

Se han presentado una propuesta la cual agiliza la implantación de la infraestructura de recarga de los vehículos

con combustibles alternativo. [10]

1.1.7 Alternativas sostenibles para transporte aéreo y marítimo.

Se expone el uso de combustibles de aviación sostenibles (electrocombustibles y biocombustibles avanzados), estos reducen de una manera significativa las emisiones de aeronaves. En la actualidad representan el 0.05% del consumo total en este sector.

Se está trabajando en medidas como son la mejora de la tecnología aeronáutica, mejoras operativas, combustibles de aviación sostenibles y el Plan de Compensación y Reducción del Carbono para la Aviación Internacional.

En cuanto al transporte marítimo se ha propuesto el uso de combustibles renovables e hipocarbonicos, con esta mejora se reducirá un 75% las emisiones producidas por este sector de aquí al 2050. [10]

1.2. Sistemas de almacenamiento actuales.

Como ya se comentó el principal problema de la transición energética es el almacenamiento de energía, punto destacable para lograr un futuro descarbonizado. En este apartado se expondrán los sistemas de almacenamientos más eficientes existentes.

La energía eléctrica se puede almacenar, podemos lograr transformarla en otros tipos, como energía mecánica o química. [11]

Se clasifican según la capacidad de almacenamiento, podemos encontrar los siguientes apartados:

- A gran escala (GW): hidroeléctrica reversible, almacenamiento térmico.
- Almacenamiento en redes (MW): pilas y baterías, condensadores y supercondensadores, volantes de inercia.
- A nivel de usuario (kW): baterías, supercondensadores, volantes de inercia.

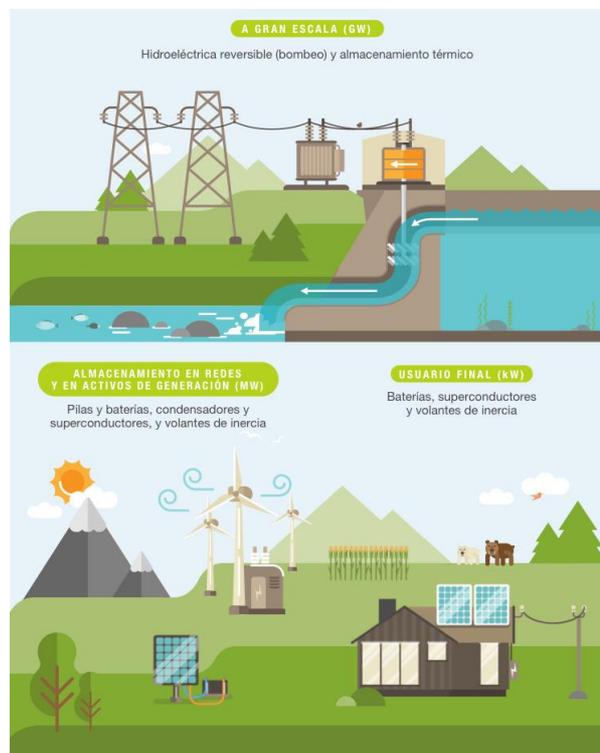


Figura 2: Almacenamiento Energetico. [11]

En los siguientes apartados se definen varios de los sistemas de almacenamiento más implantados de la actualidad.

1.2.1. Bombeo Hidroeléctrico.

El funcionamiento de este sistema de almacenamiento consiste en almacenar agua en los momentos de menor demanda y aprovecharla para generar energía en las horas de mayor consumo, consta de dos embalses a distinta altura en los que se puede realizar este proceso con éxito.

En las horas valle, cuando el coste de la energía generalmente es más barato se utilizan bombas para elevar el agua contenida en el embalse más bajo (1) al depósito superior (3), de este modo el depósito superior actúa como almacenamiento. Durante las horas pico esta central funciona como una planta hidroeléctrica convencional, aprovechando el salto de agua (2) en la que se adquiere energía cinética, para acto seguido ser transformada en energía mecánica rotatoria (6) en la turbina hidráulica. Por último se convierte en energía eléctrica de media tensión y alta intensidad en el convertidor (7). La regulación de las presiones del agua entre las conducciones se realiza por una chimenea de equilibrio (8). El transformador (9) envía la electricidad producida en la central por las líneas de alta tensión que abastece la demanda de hogares e industrias. [12]



Figura 3: Funcionamiento de una Central Hidroeléctrica de Bombeo. [12]

En España tenemos la central hidroeléctrica de bombeo más grande de Europa, ubicada en el embalse de Cortes de Pallas, con una capacidad de 880 GW. [12]

En Estados Unidos se encuentra la Central de Bath County con una capacidad de 3003 MW, la central de almacenamiento de bombeo más grande del mundo. [13]

1.2.2. Almacenamiento térmico.

Los sistemas de almacenamiento de energía térmica pueden almacenar calor o frío para ser utilizados posteriormente bajo condiciones variables. Necesitan de una fuente de calor para su posterior almacenamiento, esta fuente de calor puede proceder del sol, biomasa, calor residual industrial... Los sistemas de almacenamiento térmico tienen que presentar propiedades como una elevada capacidad térmica, volúmenes elevados y que las pérdidas de calor sean muy reducidas. [14] Estos sistemas se utilizan desde hace miles de años, ya en la Antigua Persia se empleaban cúpulas de aproximadamente 20 m de alto para almacenar hielo con una temperatura ambiente exterior de 40 °C.

La energía térmica puede ser almacenada de tres maneras: a través del calor latente, es decir, al cambiar de una fase a otra, mediante el calor sensible de los cuerpos y gracias a la energía involucrada en una reacción química. Los sistemas de almacenamiento de energía térmica retienen energía para usarla posteriormente.

El almacenamiento de calor sensible consiste en incrementar o disminuir la temperatura del medio y liberarlo con la disminución de la temperatura cuando sea necesario. Los materiales que se utilizan deben de tener una alta capacidad de calor y punto de ebullición

El almacenamiento de calor latente utiliza el calor para producir un cambio de fase en el material de almacenamiento (Figura 4), ya sea de sólido a líquido, de líquido a gas o de sólido a sólido. El más utilizado es el cambio de fase de sólido a líquido. Son capaces de almacenar cantidades elevadas de calor durante ese cambio de fase.

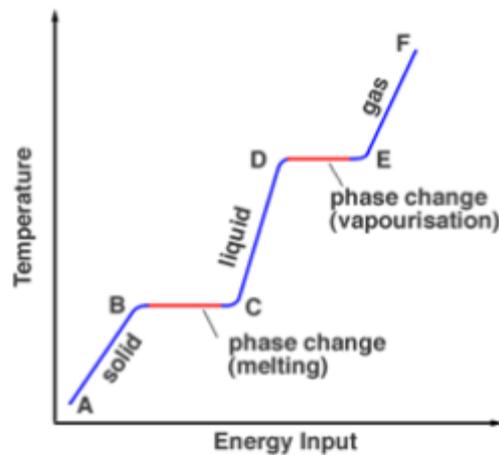


Figura 4: Cambio de fase, almacenamiento de calor latente. [60]

El sistema de almacenamiento termoquímico se diferencia de los otros dos sistemas en que se produce una variación interna del material de almacenamiento. El calor se absorbe a partir de una reacción química reversible. En la reacción endotérmica se absorbe energía térmica y en la exotérmica se descarga.

Los parámetros de caracterización de materiales de procesos de calor latente y sensible se pueden apreciar en la Tabla 1, en la Tabla 2 se observan las mismas características pero para procesos termoquímicos.

Tabla 1: Parámetros de caracterización de materiales sensibles y latentes. [15]

Propiedad	Medida	Influencia
Densidad (ρ)	Kg/m ³	
Capacidad calorífica específica (c_p)	kJ/kg·K	Capacidad de almacenamiento térmico
Calor latente de cambio de fase (h)	kJ/kg	
Temperatura de cambio de fase	°C	Aplicación térmica
Conductividad térmica (λ)	W/m·°C	Tiempo de carga/descarga
Difusividad térmica	mm ² /s	Capacidad de estratificación
Efusividad térmica	$W\sqrt{s}/m^2K$	Habilidad para intercambiar energía térmica con su entorno (Stáhl, 2009)
Coefficiente de expansión térmica	%	Cambio de volumen (Requerimientos para el contenedor)
Fiabilidad térmica ^a (Eficiencia después de ciclos térmicos)	%	Comportamiento después de varios ciclos térmicos
Estabilidad química ^a (después de ciclos térmicos)	Cambios en el espectro	Descomposición del material
Estabilidad térmica ^b (Degradación a alta temperatura)	Pérdida de peso %	Degradación del material con el incremento de temperatura

^a 5000 ciclos son requeridos para aproximadamente 13-14 años de operación (Harikrishnan et al., 2014).

Tabla 2: Parámetros de caracterización de materiales termoquímicos. [15]

Propiedad	Medida	Influencia
Densidad (ρ)	Kg/m ³	Capacidad de almacenamiento térmico
Calor de entrada	Wh/kg - MJ/m ³	
Calor de salida (densidad de AET)	Wh/kg - MJ/m ³	
Eficiencia ($Q_{\text{liberado}}/Q_{\text{almacenado}}$)	%	
Grado de carga del sorbente en el equilibrio de adsorción/absorción	% (para sorción física)	
Temperatura de carga/desorción	°C	Aplicación térmica
Temperatura de descarga/sorción	°C	
Conductividad térmica (λ)	W/m·°C	Tiempo de carga/descarga
Cinética de la reacción	m/s	
Evolución de la temperatura de salida cerca del punto de equilibrio	°C	
Rango de presión de trabajo	Pa	Requerimientos del sistema
Fiabilidad térmica (Eficiencia después de ciclos térmicos)	%	Comportamiento después de varios ciclos térmicos
Estabilidad química (después de ciclos térmicos)	Cambios en el espectro	Descomposición del material después de varios ciclos térmicos
Estabilidad térmica (Degradación a alta temperatura)	Pérdida de peso %	Degradación del material con el incremento de temperatura

En el punto 2 de este trabajo se profundiza más sobre estos procesos.

1.2.3. Aire comprimido.

Otro método para almacenar energía es el almacenamiento mediante aire comprimido. En esta tecnología se almacena el excedente de energía comprimiendo aire en depósitos. Cuando se obtienen picos de demanda de energía altos, se libera el aire comprimido y se calienta, haciendo funcionar los generadores. Estos sistemas de almacenamiento de energía han estado en uso en propulsión de locomotoras en la minería.

Cuando se comprime el aire se genera calor, en cambio cuando se expande el aire, se requiere calor para mantener la temperatura del aire. El calor disipado durante la compresión se puede utilizar para la expansión. De este modo se produce un aumento de la eficiencia y la protección del sistema contra calor liberado. [16]

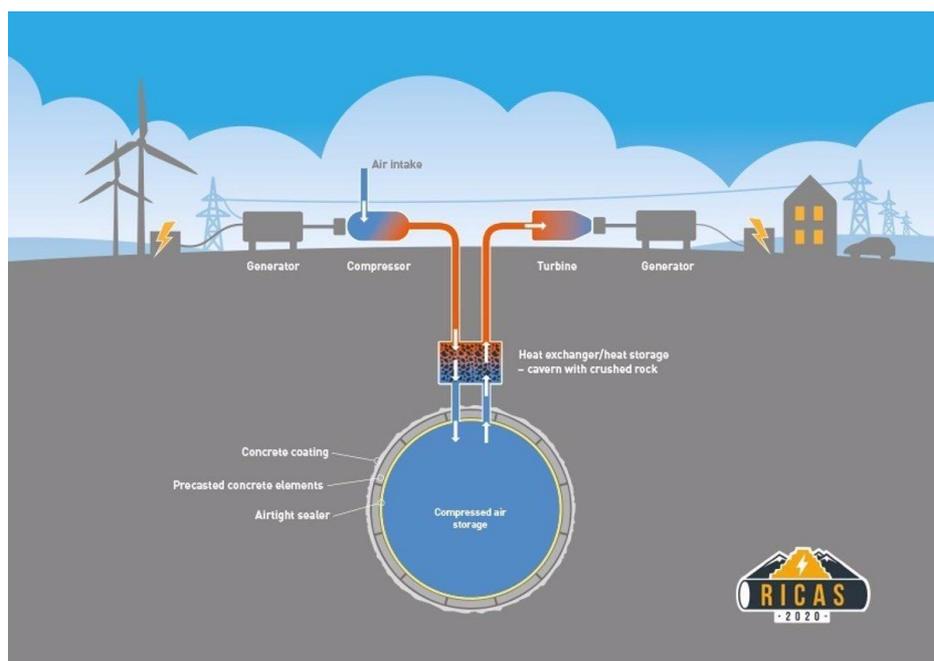


Figura 5: "Batería" de Aire Comprimido. [16]

El principal problema de esta tecnología es la acumulación de grandes cantidades de aire comprimido y la recuperación del calor de la compresión.

La compañía Hydrostor ha desarrollado una planta basada en este sistema. En ella se comprime aire a través de un acumulador de calor en el interior de globos submarinos. El aire desplaza el agua de los depósitos y se mantiene en esta posición hasta que se necesita electricidad.

Para la producción de energía eléctrica, el proceso se invierte, el peso del agua empuja el aire de nuevo a la superficie bajo presión. En la superficie, el calor almacenado se añade de nuevo en la corriente de aire. Este aire caliente se introduce en una turbina de expansión, donde se produce la generación de energía.

La empresa Dresser-Rand utiliza otro método, en este caso la acumulación de aire, se realiza en una caverna subterránea que funciona como gran depósito. El principal problema es la localización de cavernas que se adapten a estas condiciones, con una propiedad muy importante, que no se produzca fugacidad. El sistema de esta empresa utiliza tres etapas de compresión para llegar a presiones del aire de 200 bar. [17]

1.2.4. Volantes de inercia.

El almacenamiento de energía en un volante de inercia se basa en el principio de la masa giratoria, y es una tecnología de almacenamiento mecánico que emula el almacenamiento de energía eléctrica convirtiéndola en energía giratoria cinética y puede convertir la energía cinética de nuevo a energía eléctrica.

En primer lugar se obtiene la energía de entrada de cualquier fuente de energía eléctrica, el volante de inercia se acelera, una vez está acelerado se frena cuando se somete a un par resistente. Mientras mayor sea la masa a mayor distancia del centro de giro, mayor energía almacenada. Este volante giratorio se acciona mediante un motor generador eléctrico.

Está formado por un rotor giratorio, una máquina eléctrica, cuatro cojinetes, una interfaz de electrónica de potencia y una carcasa. [18]

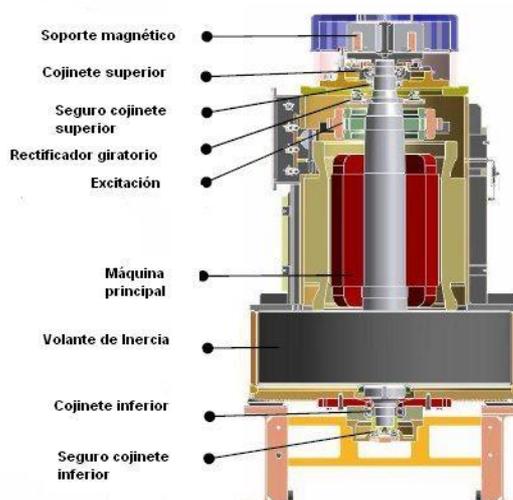


Figura 6: Partes del volante de inercia [19]

Una de las instalaciones que incorporan esta tecnología y son una realidad se encuentra en la planta de almacenamiento de energía de Stephentown de Beacon Power, tiene una capacidad de 20 MW, utiliza 200 volantes de inercia de alta velocidad. Regula la frecuencia y ofrece estabilidad a la red eléctrica de Nueva York, cubriendo sus necesidades en un 10% con una eficiencia del 97%. [19]

En la Isla de la Gomera se instaló en 2014 un sistema de volante de inercia de 0.5 MW/ 18 MWs, este proyecto denominado Store, forma parte de Endesa, con el objetivo de regular la red de la Isla. [19]

1.2.5. Baterías.

El funcionamiento se basa en un proceso reversible denominado reducción-oxidación (redox), en este proceso se oxida uno de los componentes, es decir, pierde electrones y el otro se reduce, ganando electrones. Es un proceso en el cual se cambia el estado de oxidación y a su vez se puede retornar al estado inicial.

Consta de dos o más celdas electroquímicas, cada celda se compone de un electrodo positivo llamado cátodo, un electrodo negativo llamado ánodo y electrolitos que permiten que los iones se muevan entre los electrodos.

En los acumuladores hay dos procesos principales, el de carga en la cual se le aplica una corriente externa y la descarga que produce el cierre del circuito externo.

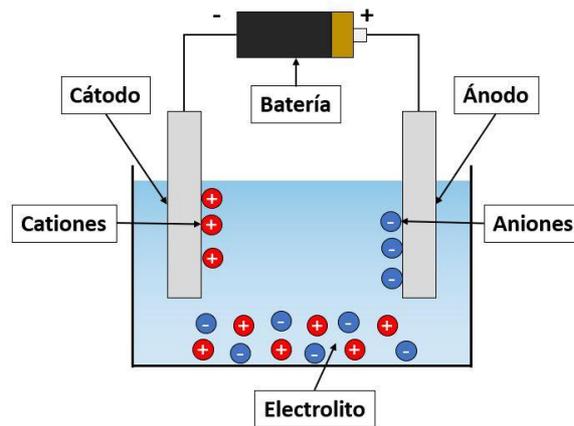


Figura 7: Electrolisis [56]

Existen diferentes tipos de baterías clasificados según su naturaleza interna: [20]

- Baterías de plomo-ácido
- Pila alcalina
- Baterías de níquel-hierro
- Baterías alcalinas de manganeso
- Baterías de níquel-cadmio
- Baterías de níquel-hidruro metálico
- Baterías de iones de litio
- Baterías de polímero de litio

De las baterías mencionadas la más popular es la batería de litio, debido a que el litio cuenta con un elevado potencial electroquímico y puede acumular grandes cantidades de energía, el principal problema es el elevado coste.

La utilización principal de estas baterías eléctricas es en la industria de los vehículos eléctricos y en instalaciones fotovoltaicas de autoconsumo.

En esta gráfica se puede observar el aumento de la producción de esta tecnología durante los últimos años.

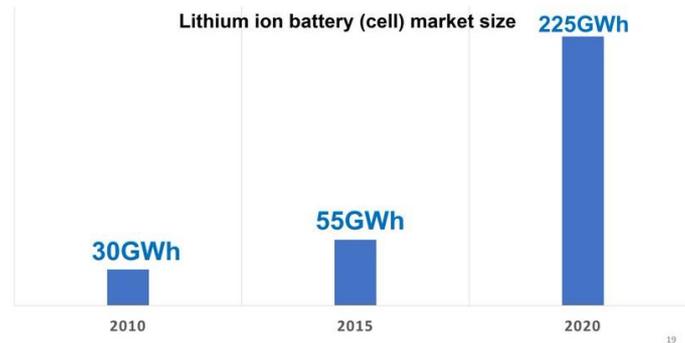


Figura 8: El mercado de baterías [57]

1.2.6. Sistemas de Almacenamiento basado en Supercondensadores.

Son elementos electrónicos que ayudan a la reserva energética. Los supercondensadores tienen características tanto de condensadores como de baterías, la diferencia es que este no depende de una reacción electroquímica, de este modo la cantidad de ciclos de cargas y descargas es mayor. La energía se almacena en forma de campo eléctrico entre electrodos. La parte aislante del dieléctrico se sustituye por un electrolito conductor de iones, el poco tiempo empleado por el movimiento de los iones por medio del electrolito permite obtener grandes niveles de energía a costo mínimo de tensión. [21]

Tienen un nivel de vida de 10 años aproximadamente y su uso principal se encuentra en el sector de las energías renovables, concretamente en la fotovoltaica y eólica. [21]

2 TIPOS DE ALMACENAMIENTO TÉRMICO

El punto fundamental de cualquier sistema de almacenamiento de energía térmica es el medio elegido para almacenar la energía, este trabajo se centra en sistemas de almacenamiento de calor sensible usando hormigón como material de almacenamiento. No obstante los sistemas de almacenamiento térmico se clasifican en almacenamiento de calor sensible, calor latente y almacenamiento termoquímico.

2.1. Selección del método de almacenamiento.

El material utilizado debe elegirse teniendo en cuenta el costo, las propiedades de los materiales, la estabilidad térmica y química con el objetivo de soportar el mayor número de ciclos térmicos. Este último punto es destacable debido a que el material utilizado juega un papel muy importante. En esta selección se debe analizar las propiedades termofísicas significativas, los más destacables son la densidad, la capacidad calorífica específica, la conductividad térmica, el coeficiente de expansión térmica y la estabilidad del ciclo, siempre teniendo en cuenta el costo y la disponibilidad de estos materiales. [22] Las propiedades termofísicas de los materiales de almacenamiento deben de considerarse, por ello se exponen en los siguientes puntos:

- Calor latente de fusión: la energía que requiere una sustancia para cambiar de estado, los materiales de cambio de fase deben de tener esta propiedad de forma elevada, para mejorar la densidad de almacenamiento de energía del sistema. [23]
- Calor específico (C_p): se define como la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de una unidad de masa de una sustancia en un grado [24], los materiales sensibles de almacenamiento deben de tener un alto calor específico de este modo se mejora la densidad de almacenamiento de energía del sistema. [23]
- Punto de fusión: esta característica consiste en el cambio de estado de una materia de sólido a líquido. Estos materiales de cambio de fase deben de tener un punto de fusión basado en el rango de temperatura de funcionamiento que requiera el sistema de almacenamiento de energía térmica. [23]
- Densidad: es la relación entre la masa y el volumen de una sustancia. El objetivo es conseguir una alta densidad, con ello mejoraremos la densidad de almacenamiento y se reducirá el volumen del sistema. [23]
- Conductividad térmica: es la capacidad de transmitir el calor de ciertos materiales, permitiendo el paso de la energía cinética de sus moléculas a otras sustancias, la alta conductividad térmica eleva la carga térmica y la tasa de descarga que se desea. [23]
- Costo y disponibilidad: el punto más importante de los mencionados es el costo y la disponibilidad, el objetivo es obtener una buena tecnología de almacenamiento con el menor costo posible, si el material está disponible y tiene un precio reducido se conseguirá reducir los costos de capital. [23]
- Súper enfriamiento: es el proceso que permite enfriar un líquido por debajo de su punto de congelación sin que se solidifique, el superenfriamiento debe ser mínimo durante el proceso de congelación en materiales de cambio de fase. [23]
- Estabilidad térmica: a altas temperaturas el material no debe descomponerse, debe tener una alta capacidad de resistir un cambio conforme cambia su temperatura, para que de este modo el rango de temperatura de operación sea más amplio. El material debe tener propiedades estables para soportar continuos ciclos térmicos de calentamiento y enfriamiento. [23]
- Estabilidad química: es la dificultad de que una sustancia reaccione con otra, si se tiene una alta estabilidad química se aumentará la vida del sistema de acumulación térmica. [23]
- Cambio de volumen: estos cambios deben de ser mínimo en los materiales de cambio de fase, deben contener un bajo coeficiente de expansión térmica. El tamaño del contenedor requerido depende

principalmente de esta propiedad. [23]

- Inflamabilidad: los materiales utilizados deben ser no inflamables y no explosivos. [23]
- Presión de vapor: una alta presión de vapor aumentaría la complejidad y los costes, es por ello que se busca tener una baja presión de vapor en el rango de temperatura operativa. [23]
- No tóxico: la salud de los operadores y el medio ambiente son puntos importantes a tener en cuenta en estos sistemas, es por ello que no deben de contener materiales tóxicos que pongan en riesgo estos dos factores. [23]
- No corrosivo: el proceso de deterioro de materiales metálicos mediante reacciones químicas debe ser muy reducido, con esto se consigue aumentar la vida de nuestro sistema. [23]

2.2. Sistemas de almacenamiento de calor sensible.

Esta tecnología se basa en realizar una elevación de la temperatura de un líquido o sólido para almacenar calor y liberarlo con la disminución de la temperatura cuando sea necesario. Los materiales de almacenamiento sensibles no experimentan cambio de fase en el rango de temperatura del proceso de almacenamiento. [25] Se acumula la energía por su capacidad calorífica específica (C_p), densidad y la difusividad térmica, que determina la velocidad en el que ese calor puede ser liberado y extraído. [22]

La energía térmica almacenada por calor sensible se expresa con la siguiente ecuación [23]:

$$Q = m * C_p * \Delta T$$

Ecuación 1: Energía térmica almacenada por calor sensible.

Donde:

Q: Energía almacenada.

m: Masa del medio de almacenamiento.

ΔT : diferencia de temperatura durante el proceso de carga o descarga.

La gran mayoría de sistemas de almacenamiento térmico instalados en plantas termosolares a gran escala de almacenaje utilizan calor sensible, principalmente tecnología que emplea sales fundidas. Con este diseño la transferencia de calor durante el proceso de carga y descarga se produce a través de convección forzada, de este modo la transferencia de calor no es una limitación severa. [22]

Tabla 3: Datos publicados sobre posibles materiales de almacenamiento de calor sensible [22]

T_{cold} (°C)	T_{hot} (°C)	Material	Thermal conductivity (W/m k)	Density (kg/m ³)	Average specific heat capacity c_p (kJ/kg K)	Volumetric specific heat capacity (kWh _m /m ³)	Type of medium
200	300	Sand-rock-oil	1	1700	1.3	60	Solid
200	400	Reinforced concrete	1.5	2200	0.85	100	Solid
200	400	Cast iron	37	7200	0.56	160	Solid
200	500	NaCl	7	2160	0.85	150	Solid
200	700	Cast steel	40	7800	0.6	450	Solid
200	700	Silica fire bricks	1.5	1820	1	150	Solid
200	1200	Magnesia fire bricks	5	3000	1.15	600	Solid
250	350	Synthetic oil	0.11	900	2.3	57	Liquid
250	450	Nitrite salts	0.57	1825	1.5	152	Liquid
270	530	Liquid sodium	71	853	1.3	80	Liquid
300	400	Silicone oil	0.1	900	2.1	52	Liquid
180	1300	Lithium liquid salt	38.1	510	4.19		Liquid
15	400	Dowtherm A	0.1171 at 155 °C	867	2.2		Liquid
0	345	Therminol 66		750	2.1		Liquid

No obstante como se observa en la Tabla 3 podemos encontrar materiales adicionales como es el hormigón, roca, arena y metal, que se encuentran en proceso de desarrollo para mejorar las técnicas de almacenamiento. En este trabajo concretamente en el punto 3 analizaremos en profundidad el sistema de almacenamiento en

hormigón.

El diseño que se emplea normalmente en el almacenamiento de calor sensible consiste en un medio de almacenamiento, un contenedor (tanque) y dispositivos de entrada y salida. Los contenedores deben de tener un buen aislamiento y de este modo evitar pérdidas de energía térmica, además debe existir un gradiente térmico a través del tanque de almacenamiento. [26]

En los siguientes puntos se describen algunos de los materiales de almacenamiento por calor sensible más destacables.

2.2.1. Almacenamiento líquido.

El almacenamiento de calor sensible es un líquido tiene una ventaja principal, se puede hacer circular con facilidad y puede transportar calor con eficiencia. Cuando la temperatura está en un rango entre 0 °C y 100 °C se suele utilizar agua como medio de almacenamiento, este tiene un calor específico alto de 4,186 J/kg*k lo que hace que su densidad sea elevada. Cuando hablamos de rangos de temperaturas diferentes al mencionado se debe utilizar líquidos distintos. Es cierto que el agua puede elevarse por encima de los 100 °C pero esto conlleva a que los costes de los sistemas de almacenamiento sean muy elevados, debido a que deben soportar altas presiones. En sistemas de almacenamiento de baja temperatura el agua puede ser mezclada con glicol etileno o glicol propíleno y gracias a esto se aumenta el rango de temperaturas. Cuando hablamos de rangos de temperaturas mayores, se usan aceites minerales, sales fundidas o metales y aleaciones líquidas. [27] [23] [28]

A continuación, se explican los principales tipos de almacenamiento en fluido.

2.2.1.1. Agua.

Para almacenamiento a baja temperatura el agua es el mejor medio de almacenamiento, su rango de funcionamiento esta entre 8°C-90°C. La ventaja principal de esta tecnología es el alto calor específico, la no toxicidad y la gran disponibilidad, la desventaja principal es el rango de temperaturas en el que puede trabajar sin pasar a un estado sólido o gaseoso, en los cuales nuestro sistema de almacenamiento no es rentable. La aplicación principal de este sistema es el uso en la calefacción y refrigeración y para el agua caliente sanitaria. [23] Aunque el uso más común en Europa está ligado con colectores solares para la producción de agua caliente y su posterior utilización en ACS y calefacción, es decir para la utilización de plantas pequeñas.

El volumen de los tanques es elevado, por ello los tanques la mayoría de las veces se encuentran en el suelo o cerca de la superficie, el material utilizado es el acero, aluminio, hormigón armado y fibra de vidrio, normalmente el aislante utilizado es la lana mineral o el poliuretano. Estas instalaciones siempre necesitan de un sistema auxiliar, que ayude a satisfacer la demanda. Este volumen comentado depende de diferentes factores como es el área del colector, el uso del sistema (no es lo mismo su uso para una piscina climatizada que para una vivienda unifamiliar, el volumen de almacenamiento depende principalmente de este factor), las condiciones meteorológicas del lugar y las características operativas del sistema. [26]

2.2.1.2. Aceite mineral.

Este fluido se utiliza como FTC en centrales de energía térmica, con este aceite mineral se capta la energía y se transporta para posteriormente generar vapor e impulsar las turbinas. Además de esa aplicación la podemos encontrar en el almacenamiento térmico, este es almacenado en tanques altamente aislados y de este modo se puede disponer de energía térmica durante la noche. [23] [28]

Se denomina instalaciones de sistema directo cuando el FTC se utiliza para almacenamiento de energía, como su nombre indica, es un almacenamiento directo, puesto que no necesita de un intercambiador de calor. El aceite mineral funciona en forma líquida hasta los 400 °C y tiene una presión de vapor inferior al agua. [23]

Durante la noche no se congela, esto hace presentar una ventaja frente a las sales fundidas, las cuales necesitan de sistemas auxiliares para evitar esta propiedad. Pero a diferencia del precio del agua o las sales fundidas este material tiene un elevado coste como se puede observar en la Tabla 4.

Tabla 4: Características principales de los materiales de Calor Sensible [28]

Storage medium	Temperature		Average density (kg/m ³)	Average thermal conductivity (W/m K)	Average heat capacity (kJ/kg K)	Volume specific heat capacity (kWh _t /m ³)	Media costs per kg (US\$/kWh _t)	Media costs per kWh _t (US\$/kWh _t)
	Cold (°C)	Hot (°C)						
HITEC solar salt	120	133	–	–	–	–	–	–
Mineral oil	200	300	770	0.12	2.6	55	0.30	4.2
Synthetic oil	250	350	900	0.11	2.3	57	3.00	43.0
Silicone oil	300	400	900	0.10	2.1	52	5.00	80.0
Nitrite salts	250	450	1825	0.57	1.5	152	1.00	12.0
Nitrate salts	265	565	1870	0.52	1.6	250	0.50	3.7
Carbonate salts	450	850	2100	2.0	1.8	430	2.40	11.0
Liquid sodium	270	530	850	71.0	1.3	80	2.00	21.0

2.2.1.3. Sales fundidas.

Este material de almacenamiento es el más usado en centrales solares térmicas. Son elementos muy baratos, con una alta densidad en comparación con otros materiales, lo que conlleva a una alta densidad de almacenamiento de energía. La presión de vapor es inferior a la del agua y funcionan a altas temperaturas, pueden llegar hasta 550 °C, todos estos valores se pueden observar en la Tabla 4. [23]

Al poder trabajar con altas temperaturas el ciclo de la planta aumenta, mejorando la eficiencia del ciclo termodinámico de Rankine. El principal problema es el punto de fusión, hay que conseguir mantener esta propiedad de forma inferior, de este modo evitaremos la congelación. El punto de fusión de las sales suele estar por un rango superior a los 200°C, los cuales se pueden bajar a un rango inferior a los 100 °C utilizando compuestos de sal, esta modificación no altera la temperatura máxima superior. [23]

Este fluido se puede utilizar también como FTC, pero presentan diferentes ventajas como es la mencionada de la congelación, la gran facilidad de producir corrosión y oxidación de los materiales.

Las principales sales utilizadas son la sal solar y una sal denominada HitecXL, la sal solar es una sal binaria que consta de 60% de NaNO₃ y 40% de KNO₃, la sal se funde a 221 °C y se mantiene líquida a 288°C. [28]

La sal que se vende comercialmente como HitecXL es una sal ternaria compuesta por 48% CA(NO₃)₂, 7% de NaNO₃ y 45% de KNO₃. [28]

2.2.1.4. Metales y aleaciones líquidas.

Otro material utilizado que tienen como propiedad que su punto de fusión es bajo, pero por encima de los 300°C son los metales y aleaciones puras. Tienen una alta conductividad térmica y el rango de temperatura máximo es elevado. Su presión de vapor es mínima, pero el coste de este material es muy elevado, es por ello que no se suele aplicar en los sistemas de almacenamiento. [23]

2.2.2. Almacenamiento en medios sólidos.

Los materiales sólidos, como las rocas y los metales se utilizan para almacenar energía térmica tanto a temperaturas bajas como altas. Son materiales que no se congelan ni hierven. Las desventajas de almacenamiento líquido se pueden evitar almacenando energía térmica como calor sensible en sólidos, además los costes son bajos. La presión de funcionamiento es la presión ambiente, no hay necesidad de presurizar y el problema de fugas queda totalmente eliminado. [23] [26]

Existen diversos problemas en esta tecnología, el material de las tuberías por donde se produce el transporte de calor y así mismo la transferencia de calor al sólido debe ser del mismo material que el del medio de almacenamiento. No obstante, si el material es diferente, se puede producir una separación como resultado de diferentes coeficientes de expansión para la tubería y los materiales de almacenamiento. Se realizan diversas combinaciones de materiales sólidos, un claro ejemplo es el almacenamiento entre grafito y hormigón. [26]

Los materiales más estudiados en medios sólidos son el hormigón y la cerámica moldeable, presentan un bajo coste y buena conductividad térmica. En este presenta trabajo se estudiará en concreto el hormigón, que durante los últimos años diversos estudios de DLR han demostrado que es una buena solución para esta tecnología, por los costes que presenta y su fácil manejo, además de una buena estabilidad estructural. [28]

La Tabla 5 muestra las características principales de los almacenamientos térmicos sólidos. No obstante, en los siguientes puntos se hará una breve introducción a estos.

Tabla 5: Principales características de materiales sólidos. [28]

Storage medium	Temperature		Average density (kg/m ³)	Average heat conductivity (W/m K)	Average heat capacity (kJ/kg K)	Volume specific heat capacity (kWh _t /m ³)	Media costs per kg (US\$/kWh _t)	Media costs per kWh _t (US\$/kWh _t)
	Cold (°C)	Hot (°C)						
Sand-rock-mineral oil	200	300	1700	1.0	1.30	60	0.15	4.2
Reinforced concrete	200	400	2200	1.5	0.85	100	0.05	1.0
NaCl (solid)	200	500	2160	7.0	0.85	150	0.15	1.5
Cast iron	200	400	7200	37.0	0.56	160	1.00	32.0
Cast steel	200	700	7800	40.0	0.60	450	5.00	60.0
Silica fire bricks	200	700	1820	1.5	1.00	150	1.00	7.0
Magnesia fire bricks	200	1200	3000	5.0	1.15	600	2.00	6.0

2.2.2.1. Rocas.

Se utilizan en un lecho compacto una vez se han triturado a tamaños próximos a los 5 cm, es especialmente adecuado cuando el fluido de transferencia de calor es el aire. [29] EL fluido fluye entre las aberturas de las rocas compactas y calienta la roca durante el proceso de carga, en la descarga el fluido frío fluye entre las aberturas y se calienta. [23]

La superficie de contacto entre la roca y el fluido es alta, como consecuencia se mejora la eficiencia de transferencia energética. El caudal de fluido demandado es muy elevado, por ello es su principal desventaja.

2.2.2.2. Hormigón.

Es un material sólido y destacado por su bajo costo y buena conductividad. Esta tecnología ya ha sido probada en la planta solar de Almería y por DLR (Alemania), dando una respuesta adecuada. [30] El funcionamiento consiste en un intercambiador de calor entre el hormigón y el fluido calo portador que fluye a través de tuberías integradas en el bloque de hormigón. [23]

Es un sistema que sigue en estudio debido a que no está definido con claridad la durabilidad de este material y las mezclas adecuadas para conseguir una buena eficiencia. [30]

Este material es usado para operar en plantas de gran capacidad. El estudio principal en la actualidad son las mezclas adecuadas para aumentar la conductividad. [30]

2.2.2.3. Arena.

Se utilizan materiales de grano pequeño como grava o arena de sílice. Este último tiene un tamaño promedio de 0.2-0.5 mm, se aplican en sistemas de almacenamiento de calor de lecho comprimido en los cuales el fluido calo portador es el aire. No obstante la grava de basalto tiene un promedio de 0.4 mm, este puede ser utilizado directamente para absorber los rayos de sol y funcionar así como un receptor solar, después el material caliente es recogido en un pozo de almacenamiento aislado térmicamente. Pueden alcanzar temperaturas que van desde los 700 a 1000°C, temperatura adecuada para producir vapor y hacer funcionar las turbinas de vapor que producirán la electricidad. [23]

Hay estudios que afirman que la arena tiene un potencial de almacenamiento de temperaturas que rondan los 550°C. [23]

2.2.2.4. Ladrillos.

Este material se ha estudiado principalmente para el uso en hogares, durante la noche que la electricidad tiene un precio inferior se calienta el ladrillo y durante el día el calor almacenado se extrae por convección natural y radiación. Con este sistema logramos conseguir calefacción durante las horas pico sin consumo de electricidad. [23]

2.3. Sistemas de almacenamiento de calor latente.

En los sistemas de almacenamiento latente, se produce un cambio de fase del medio térmico durante el proceso

de almacenamiento de energía, se les denomina material de cambio de fase. Se requieren volúmenes de almacenamiento inferiores a los sistemas de calor sensible, la variación de temperatura está restringida debido a que los cambios de fase ocurren a temperaturas casi constantes. [26]

La energía térmica que el material almacena se rige a la siguiente ecuación:

$$Q = m * L$$

Ecuación 2: Sistema de almacenamiento de calor sensible.

Donde m es la masa y L es el calor latente de fusión.

Según el tipo de cambio de fase, el material de cambio de fase puede ser sólido-sólido, sólido-líquido o líquido-gas. Para las aplicaciones de almacenamiento el más adecuado es el cambio de fase sólido-líquido, no obstante el método de calor latente presenta diferentes dificultades que se deben al cambio de densidad, la estabilidad de las propiedades bajo ciclos prolongados y la segregación de fases y superenfriamiento de los materiales. Además el almacenamiento de calor latente tiene una baja conductividad, limitando así la potencia que se puede extraer del sistema de almacenamiento de energía. [26]

Los criterios que se tienen en cuenta para una buena selección de materiales de almacenamiento de calor de cambio de fase son los siguientes [26]:

- Observar el punto de fusión y comprobar que se encuentra dentro del rango de temperatura de funcionamiento.
- Tener alto calor latente de fusión, con esto se logra almacenar energía con una menor cantidad de material.
- Alto calor específico.
- Alta conductividad térmica.
- Pequeños cambios de volúmenes durante los cambios de fase, para poder utilizar geometrías simples.
- Tener el menor sobre-enfriamiento posible durante la congelación.
- Contener una buena estabilidad química, junto con una notable resistencia a la corrosión.
- Disponibilidad de material por un bajo costo.
- Materiales que no sean tóxicos, inflamables y explosivos.

Tabla 6: Datos termo-físicas de algunos materiales de cambio de fase [26]

Compound	Melting temp. (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)	Thermal conductivity (W/m K)	Density (kg/m ³)
<i>Inorganics</i>				
Mg Cl₂ · 6H₂O	117	168.6	0.570 (liquid, 120 °C) 0.694 (solid; 90 °C)	1450 (liquid, 120 °C) 1569 (solid; 90 °C)
Mg(NO₃)₂ · 6H₂O	89	162.8	0.490 (liquid, 95 °C) 0.611 (solid; 37 °C)	1550 (liquid, 94 °C) 1636 (solid; 25 °C)
Ba(OH)₂ · 8H₂O	48	265.7	0.653 (liquid, 85.7 °C) 1.225 (solid; 23 °C)	1937 (liquid, 84 °C) 2070 (solid; 24 °C)
CaCl₂ · 6H₂O	29	190.8	0.540 (liquid, 38.7 °C) 0.1088 (solid; 23 °C)	1562 (liquid, 32 °C) 1802 (solid; 24 °C)
<i>Organics</i>				
Paraffin wax	64	173.6	0.167 (liquid, 63.5 °C) 0.346 (solid; 33.6 °C)	790 (liquid, 65 °C) 916 (solid; 24 °C)
Polyglycol E600	22	127.2	0.189 (liquid, 38.6 °C)	1126 (liquid, 25 °C) 1232 (solid; 4 °C)
<i>Fatty acid</i>				
Palmitic acid	64	185.4	0.162 (liquid, 68.4 °C)	850 (liquid, 65 °C) 989 (solid; 24 °C)
Capric acid	32	152.7	0.570 (liquid, 38.5 °C)	878 (liquid, 45 °C) 1004 (solid; 24 °C)
Caprylic acid	16	148.5	0.570 (liquid, 38.5 °C)	901 (liquid, 30 °C) 981 (solid; 13 °C)
<i>Aromatics</i>				
Naphthalene	80	147.7	0.132 (liquid, 83.8 °C) 0.341 (solid; 49.9 °C)	976 (liquid, 84 °C) 1145 (solid; 20 °C)

La Tabla 6 muestra las propiedades termo-físicas de los materiales de cambio de fase, se observa que los compuestos inorgánicos, como pueden ser las sales hidratadas, tienen mayor densidad volumétrica que la mayoría de los orgánicos, debido a su mayor calor latente y densidad, ya que son dos propiedades importantes a analizar a la hora de elegir el material, como se comentó en el párrafo anterior. En los siguientes apartados se hace referencia a estos dos tipos de materiales y sus características principales. [26]

2.3.1. Materiales de cambio de fase orgánicos.

Dentro de este gran bloque nos podemos encontrar materiales de cambio de fase orgánicos, estos a su vez se clasifican en dos grupos, con parafina y sin parafina. Se caracterizan por la fusión congruente, la autonucleación y la no corrosividad.

El material más importante dentro de este bloque es la cera de parafina, la cual está compuesta por una mezcla de n-alcenos de cadena lineal, este material es muy estable hasta los 500°C, no es corrosivo y notable por los pocos cambios de volumen durante el proceso de fusión. No obstante, tiene una conductividad térmica muy baja, es incompatible con el plástico y muy inflamable. [26]

El material de cambio de fase sin parafina más destacable son los ácidos grasos, estos materiales son versátiles y muy variables entre sí, tienen una alta capacidad de almacenamiento de calor latente, el superenfriamiento es nulo, buena estabilidad química. Las desventajas son similares a la parafina, contiene baja conductividad térmica, es tóxico, inflamable y muy inestable a altas temperaturas. [26]

2.3.2. Materiales de cambio de fase inorgánicos.

Dentro del bloque de los materiales de cambio de fase inorgánicos tenemos hidratos de sal, sales, metales y aleaciones. La ventaja principal de este sistema es la alta capacidad volumétrica de almacenamiento de calor latente y la alta conductividad térmica. [26]

Los hidratos de sal se utilizan normalmente a bajas temperaturas, tiene una fórmula $AB \cdot nH_2O$, contienen agua de cristalización, la transformación sólido-líquido consiste en una deshidratación de la sal, aunque es similar a la fusión o congelación. [23] Se caracterizan por el alto calor latente de fusión por unidad de volumen, la conductividad térmica elevada, estas pueden ser dos veces mayor que las parafinas, el coste es bajo y nulo riesgo de incendio, son compatibles con recipientes de plástico, no obstante son corrosivos, tóxicos. [26]

Las sales inorgánicas tienen temperaturas de operación similares a las sales fundidas, se utilizan como materiales latentes de almacenamiento de calor para temperaturas superiores a los 100°C, además tienen una amplia gama de temperaturas de fusión. [23]

Los metales tienen elevados valores de conductividad térmica, tienen un cambio considerable en el volumen durante el cambio de fase. [23]

2.3.3. Eutéctico.

Este es una mezcla de punto de fusión mínima de varios materiales de cambio de fase, estos tienen una temperatura de cambio de fase fija, es decir cada uno cambia su fase de forma congruente, esto conlleva a la imposibilidad de separación de los componentes. [23]

Se clasifican en tres subgrupos:

- Inorgánico-inorgánico eutéctico.
- Orgánico-orgánico eutéctico.
- Orgánico-inorgánico eutéctico.

2.4. Sistemas de almacenamiento termoquímico.

Este sistema consiste en utilizar el calor recogido para excitar una reacción química endotérmica reversible. Para recuperar este calor almacenado se invierte la reacción, a menudo utilizando un catalizador. [23] Para este tipo de sistemas de almacenamiento es necesario que las reacciones químicas sean completamente reversibles. El

calor que se produce por el receptor solar es necesario para excitar una reacción química endotérmica, al tener la propiedad mencionada de ser totalmente reversible, la energía térmica se recupera por completo mediante la reacción inversa. [28]

En la carga una reacción química endotérmica hacia adelante absorbe calor y a continuación esa energía se utiliza para la disociación del reactivo químico C en los productos A y B. En segundo lugar, en la descarga, los reactantes A y B experimentan el proceso inverso, es decir se produce una reacción exotérmica hacia atrás que produce C produciendo calor en el proceso. [23]

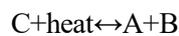
La ecuación ligada a este sistema de almacenamiento termoquímico se rige a la siguiente expresión:

$$Q = n * \Delta H$$

Ecuación 3: Sistema de almacenamiento termoquímico.

Donde n es el número molar del reactivo y H es la entalpía de la reacción.

La reacción que se puede invertir y que está relacionada con este sistema de almacenamiento se expresa de la siguiente forma:



Los materiales potenciales que se pueden encontrar para el almacenamiento de reacciones químicas son los que se exponen en la siguiente Tabla 7.

Tabla 7: Materiales para el almacenamiento termoquímico. [26]

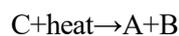
Material	Dissociation reaction	Energy density storage (GJ/m ³)	Turnover temperature (°C)
Magnesium sulfate	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{MgSO}_4 + 7\text{H}_2\text{O}$	2.8	122
Silicon oxide	$\text{SiO}_2 \Rightarrow \text{Si} + \text{O}_2$	37.9	4065 + HF: 150 (????)
Iron carbonate	$\text{FeCO}_3 \Rightarrow \text{FeO} + \text{CO}_2$	2.6	180
Iron hydroxide	$\text{Fe}(\text{OH})_2 \Rightarrow \text{FeO} + \text{H}_2\text{O}$	2.2	150
Calcium sulfate	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	1.4	89

Estos materiales fueron seleccionados por Mugnier y Goetz como los mejores candidatos para este tipo de sistemas de almacenamiento. [26]

2.4.1. Proceso de carga en un Sistema termoquímico.

Se absorbe energía térmica de un recurso energético, este puede ser renovable o de fuentes de energía como combustibles fósiles. Acto seguido esta energía se aplica para realizar la disociación del material termoquímico que es equivalente a la entalpía de formación. A continuación, se forman dos materiales A y B que se pueden almacenar. [26]

Esta reacción se puede expresar con la siguiente ecuación:



2.4.2. Almacenamiento.

El almacenamiento se produce acto seguido del proceso de carga, en este proceso los componentes A y B se almacenan por separado, estos producen pérdidas de energía nulas. No se generan pérdidas térmicas debido a que los materiales se almacenan a temperatura ambiente. [26]

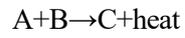
Las pérdidas ligadas a este proceso se deben a la degradación de materiales. [26]

La densidad de energía que se almacena en este proceso es mayor que la almacenada en materiales de calor

sensible y latente

2.4.3. Descarga.

En este paso, A y B se ordenan en una reacción exotérmica y el componente C se regenera y se puede utilizar en un nuevo ciclo. Quedando la reacción con la siguiente expresión:



3 SISTEMA DE ALMACENAMIENTO EN HORMIGÓN

El almacenamiento térmico como ya se comenta en este proyecto tiene el potencial de incrementar el uso efectivo de la energía térmica, de este modo se facilita el control de la producción térmica. Gracias a este sistema se corrige la discordancia entre demanda y producción de energía.

En el apartado anterior se expuso los tipos de almacenamientos térmicos que existen, en este apartado nos centramos en el almacenamiento sensible concretamente en el uso de materiales sólidos como es el hormigón.

3.1. Modelo

El hormigón como material tiene un potencial muy grande que se está incorporando en los procesos industriales y de producción de energía. Es una alternativa económica a los elevados costes que existen para el almacenamiento de grandes cantidades de energía. Además su geometría modular y flexible permite reducir la superficie de almacenamiento considerablemente. El hormigón consta de una capacidad térmica muy elevada lo que hace disponer de un sistema de almacenamiento de calor compacto y económico. [31]

Principalmente este sistema lleva integrado en su interior un intercambiador de calor tubular, por el que circula el fluido HFT. Este fluido proveniente del campo solar, atraviesa el sistema de tubos que funciona como intercambiador de calor, transfiriendo su energía térmica al hormigón, saliendo de este sistema con menor temperatura (Figura 9), la cual es devuelta al campo solar, este proceso ocurre en el transcurso de carga, finaliza cuando la temperatura del sistema alcanza una temperatura aproximada a la temperatura de entrada del fluido

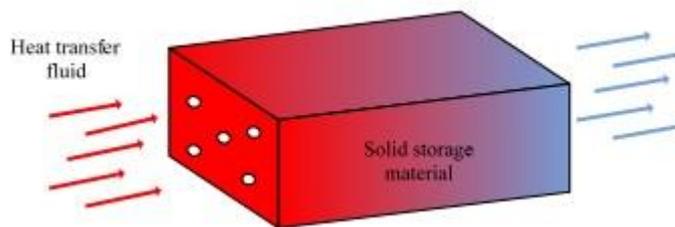


Figura 9: Módulo típico de almacenamiento de calor sensible en medio sólido. [32]

térmico, el tiempo empleado en este proceso se denomina tiempo de carga. En cuanto a la descarga, se realiza el mismo método pero en sentido inverso a la carga, dirigiéndose el fluido a la turbina de vapor, es decir, el hormigón se enfría, liberando la energía del hormigón y absorbiéndola el fluido térmico, este tiempo se denomina tiempo de descarga.

Podemos observar una sección transversal del modelo de almacenamiento sólido en la Figura 10, se observa

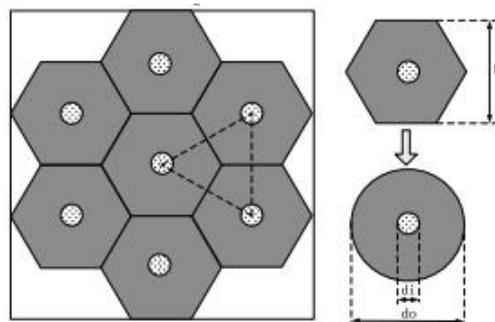


Figura 10: Sección transversal modelo de almacenamiento sólido. [32]

como los tubos introducidos en la estructura de hormigón fueron distribuidos siguiendo una geometría triangular, de este modo se obtiene una mejor distribución de temperatura en el módulo de almacenamiento de sólidos. Todo el módulo de almacenamiento se compone de muchas unidades de almacenamiento con secciones transversales hexagonales regulares. La unidad de almacenamiento reemplaza la forma hexagonal regular por una geometría de unidad de almacenamiento cilíndrica con la misma área de sección transversal. [32] La geometría se puede representar siguiendo la siguiente ecuación:

$$d_0^2 = 2\sqrt{3} * D^2 / \pi$$

Ecuación 4: Geometría de la unidad de almacenamiento. [32]

En el interior del tubo el flujo del fluido de transferencia de calor se distribuye uniformemente, por ello el módulo de almacenamiento tiene similar comportamiento térmico que la unidad de almacenamiento de calor cilíndrica que se muestra en la siguiente Figura 11.

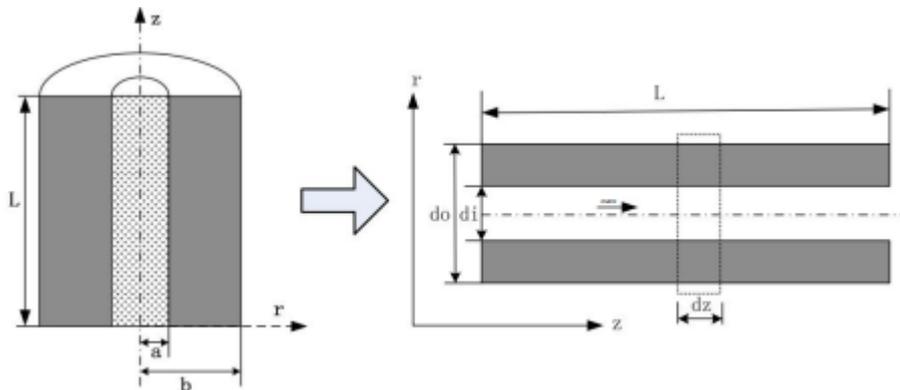


Figura 11: Unidad de almacenamiento de calor cilíndrico. [32]

El intercambiador de calor puede seguir diferentes geometrías:

- Intercambiador de calor de tubo liso.
- Intercambiador de calor con forma helicoidal.
- Intercambiador de calor con aletas longitudinales.
- Intercambiador de calor con aletas en forma de barras.
- Intercambiador de calor con aletas en forma de discos.

Aunque según un estudio realizado por Dr. R. Panneer Selvam [33], la geometría óptima para un intercambiador de calor para un sistema de almacenamiento en hormigón es de espiral, la desventaja de este producto es su elevado coste.

No obstante, en la actualidad se utilizan intercambiadores de calor lisos.

3.1.1 Material del intercambiador de calor.

Los tubos del intercambiador de calor son de acero, se usa este material por la buena transferencia de calor que tiene hacia el hormigón.

El inconveniente principal es su uso en conjunto, debido a que la diferencia entre sus coeficientes de expansión térmica, esto puede producir tensión mecánica y grietas. Para solucionar este problema se usa un material en la interface del tubo y el hormigón o se utilizan tubos de acero al carbón.

Los materiales que se colocan entre el intercambiador y el hormigón suelen ser Teflón, Deacon y papel de aluminio. Este último se evita utilizar debido a que produce resistencia a la conductividad térmica.

3.1.2 Análisis de transferencia de calor en una estructura de hormigón empotrada en tuberías.

En este apartado se analizará un nuevo modelo simplificado para el cálculo de un sistema TES pasivo sensible, concretamente se indaga sobre la transferencia de calor transitoria en una estructura de hormigón empotrada con tuberías. La información se obtiene de Christian Suarez [34], y en su trabajo se muestran los resultados transitorios de interés en el módulo TES: la cantidad de calor absorbida y liberada, la temperatura de salida del HTF.

El HTF usado es aceite sintético es por ello que la temperatura está limitada a 400 °C. Como ya se ha mencionado en diferentes conclusiones, es importante evitar el contacto directo entre el hormigón y las tuberías de acero, debido a que se pueden crear tensiones mecánicas y grietas como consecuencia de los diferentes coeficientes de dilatación de los materiales. La solución a este problema es añadir en el diseño una capa intermedia de materiales tales como Teflón, Deacon o papel de aluminio.

Al igual que en la literatura utilizada para el punto anterior [32], se elige una disposición de paso triangular equilátero de 60°, esta geometría es la más compacta y se obtiene una mejor distribución de temperatura en el hormigón, en la Figura 10 se puede observar la configuración exacta.

Se consideran los siguientes procesos para el modelado:

- Convección turbulenta en el interior de las tuberías.
- Transferencia de calor por conducción en el volumen de la tubería.
- Transferencia de calor por conducción en la interface tubería-hormigón.
- Transferencia de calor por conducción en el volumen de hormigón.

En la Figura 12 se aprecia un esquema de la disposición de medios sólidos del hormigón y las condiciones de contorno de simetría para los tres dominios, el primer dominio es el HTF en el cual el fluido ingresa por la entrada y sale por el límite de apertura. Cabe destacar que como consecuencia de que los tubos son lisos, la resistencia de ensuciamiento es insignificante y por ello en el modelo la descartan. El segundo dominio es el hormigón, cuyas condiciones de contorno es aplicada a las seis superficies exteriores. En la interfaz tubería-hormigón se considera la existencia de una resistencia térmica de contacto. El resto de superficies ubicadas en los tramos verticales de entrada y salida se consideran adiabáticos.

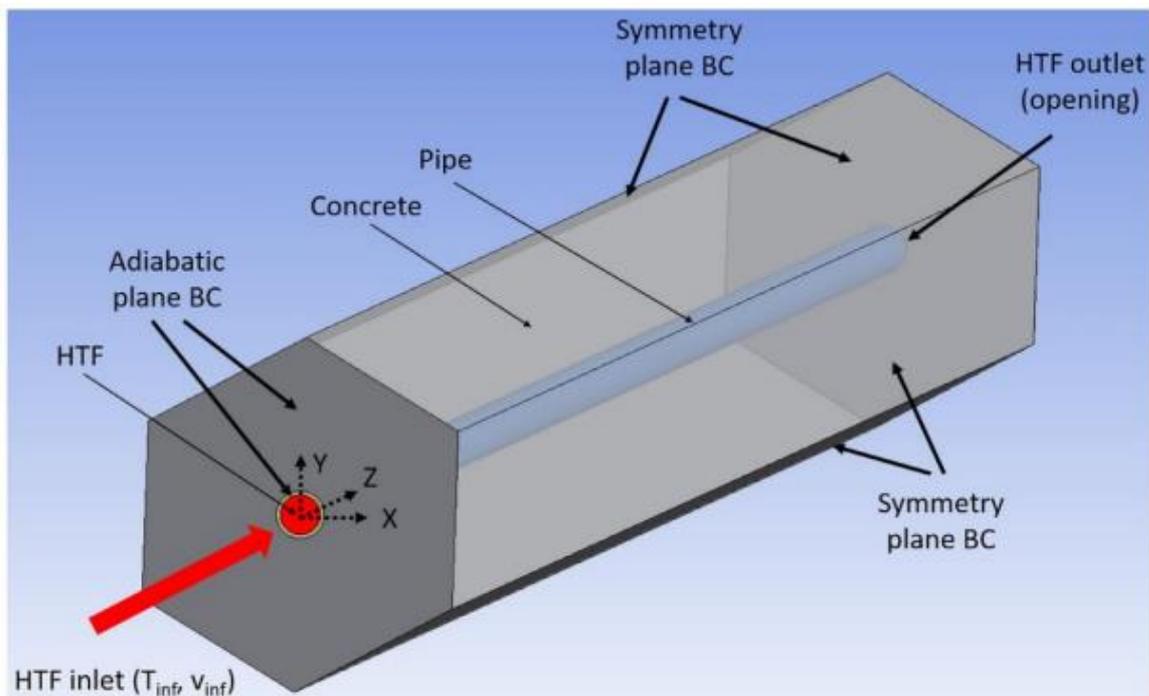


Figura 12: Esquema del modelo a estudiar. [34]

Los resultados obtenidos de este modelo implicado se aprecian en las Figura 13 y Figura 14 donde se puede observar cómo concuerdan con lo expuesto por Laing en [35].

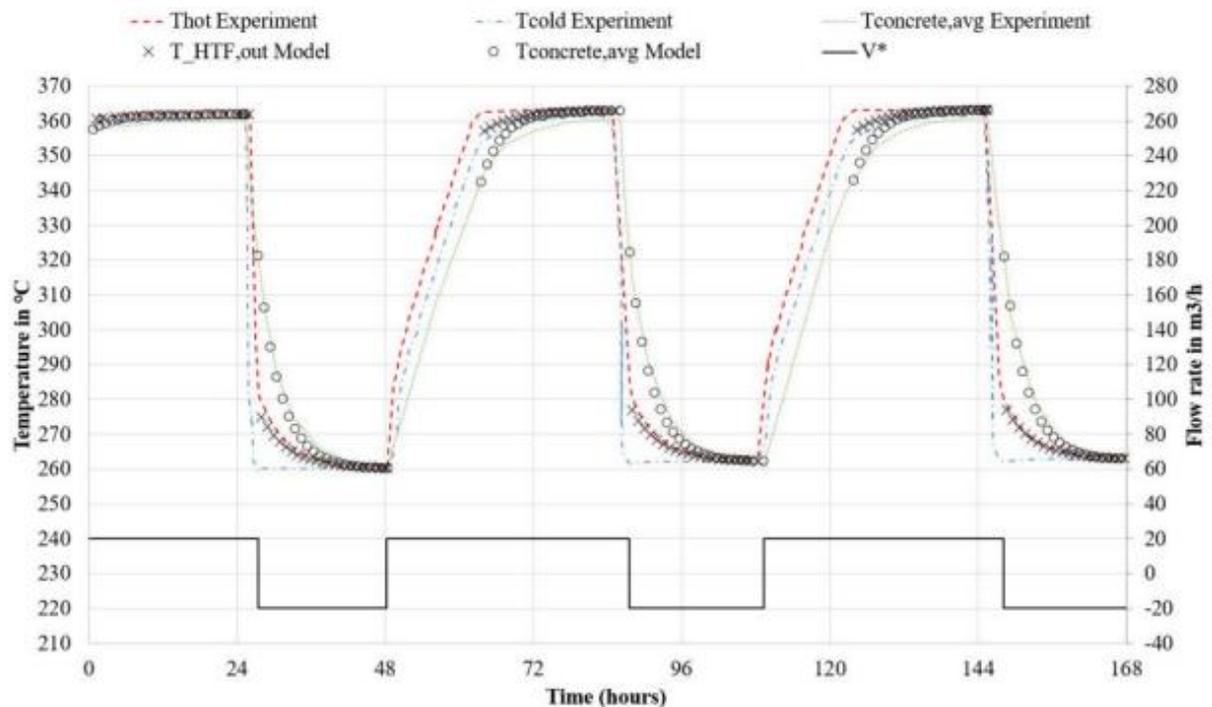


Figura 13: Aplicación del modelo propuesto. [34]

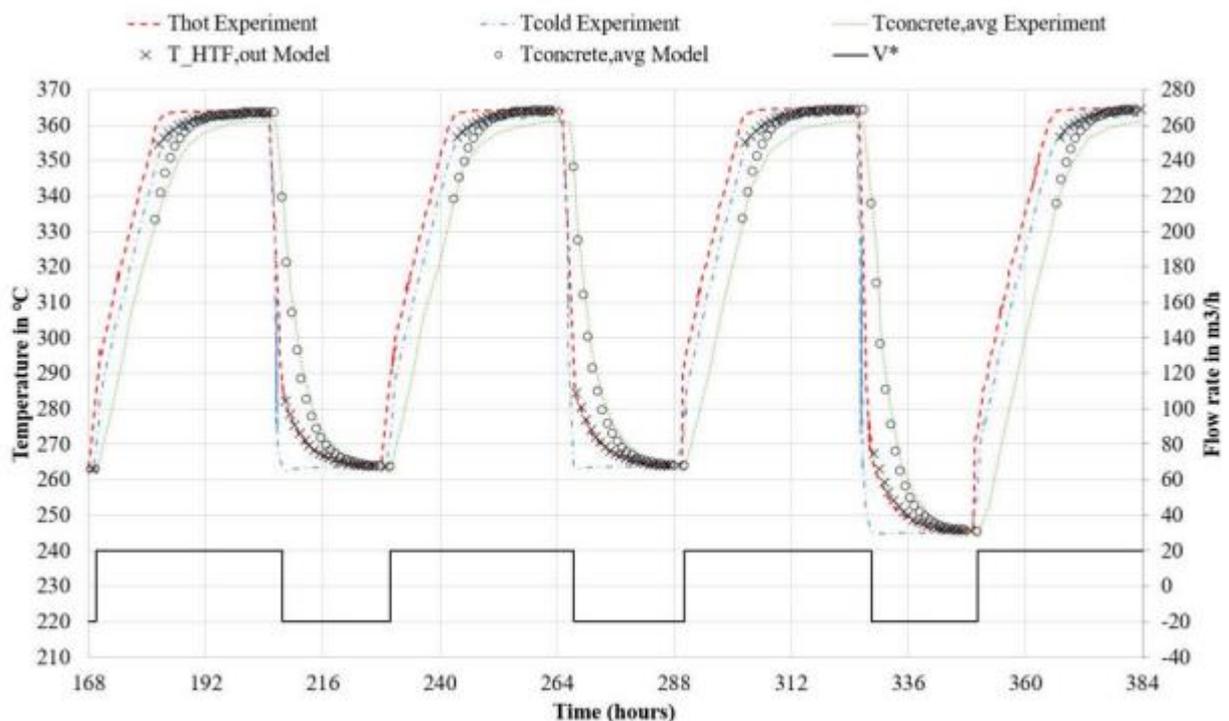


Figura 14: Aplicación del modelo propuesto. [35]

En la Figura 15 y en la Figura 16 (más detallado) se puede ver las temperaturas de entrada durante la carga, la temperatura de salida durante la descarga y la temperatura media del material de almacenamiento realizadas en un estudio idéntico llevado a cabo por Laing en [35], comparando con el ya mencionado se observa que el modelo simplificado expuesto por Christian Suarez [34] concuerda a la perfección. La temperatura de salida del HTF presenta una diferencia de temperatura de ± 3 °C, resultados similares presenta la temperatura media del material con una diferencia de ± 5 °C.

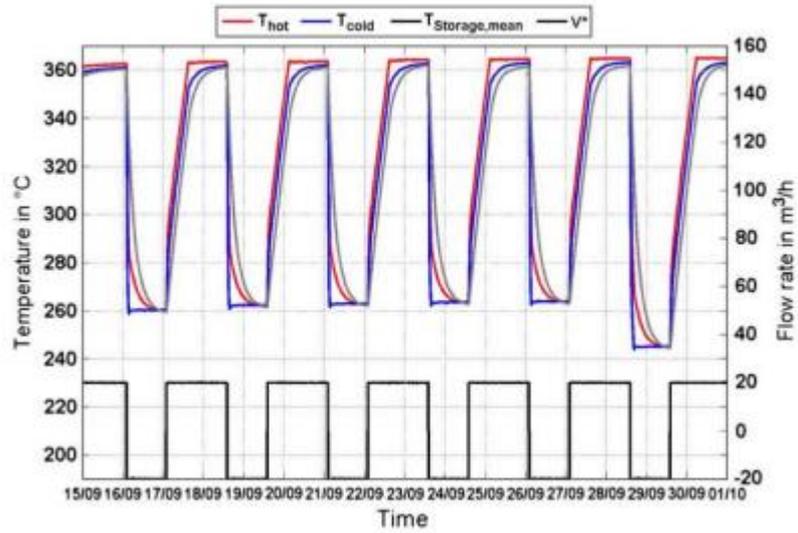


Figura 15: Ejemplo de termocilado del modulo de ensayo. [35]

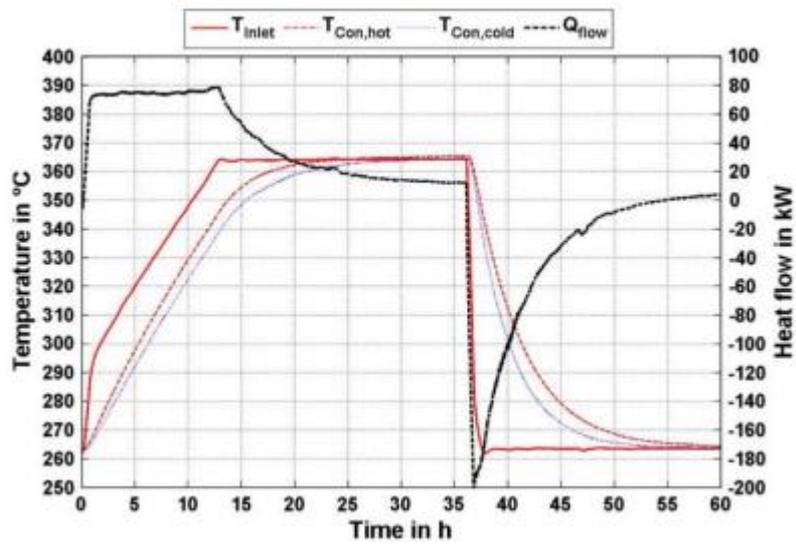


Figura 16: Ejemplo de termocilado del módulo de ensayo más detallado. [35]

3.2. Hormigón como material de almacenamiento.

El hormigón se elige principalmente por su bajo costo, disponibilidad y fácil procesamiento, tiene un calor específico elevado y sus propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión son muy buenas, el coeficiente de expansión térmica es muy bueno y contiene una alta resistencia mecánica a la carga térmica cíclica. [28]

Cuando el hormigón absorbe calor, se producen una serie de reacciones y transformaciones que afectan a sus propiedades físicas. A 400°C la resistencia a la compresión disminuye un 20%, el calor específico disminuye cuando se encuentra en un rango dispuesto entre 20 y 120°C, así mismo la conductividad térmica disminuye entre 20 y 280°C. Se puede añadir al hormigón diferentes materiales que proporcionaran un progreso en sus propiedades físicas tales como la mejora de la resistencia a los ciclos térmicos, que depende únicamente de la dilatación térmica de estos materiales adicionales. [28]

Se pueden agregar agujas de acero para evitar el agrietamiento y mejorar la conductividad térmica, que aumenta alrededor de un 15% a 100°C y un 10% a 250 °C. [28]

Las propiedades del hormigón como material de almacenamiento para alta temperatura son las expuestas en la siguiente Tabla 8.

Tabla 8: Propiedades del hormigón como sistema de almacenamiento, para alta temperatura. [28]

Material	High temperature concrete
Density at 200 °C [kg/m ³]	2700
Specific heat capacity at 200 °C [J/kg K]	910
Thermal conductivity at 200 °C [W/m K]	1.0
Coefficient thermal expansion at 200 °C [10 ⁻⁶ /K]	9.3
Capacity [kWh/m ³ K]	0.68

3.3. Composición del hormigón.

Como resultado de la mezcla entre cemento, arena y piedras obtenemos el hormigón. Este material se emplea en la construcción.

El hormigón está compuesto por un 10-15% de aglomerante, un 65-75% de granos sintéticos, agregado fino procedente de la arena, agregado grueso de la grava o piedra, un 15-20% de agua y aire aprisionado 1-2%.

La pasta de cemento se consigue al mezclar cemento y agua, si además se añade arena se denomina mortero y si finalmente se le añade grava obtenemos cemento. [36]

Los agregados más importantes son la arena y la grava que influyen en las características principales del hormigón. Según el propósito del producto se añade más cantidad o menos, si se desea una mayor densidad se añade una proporción superior de agregados gruesos.

La densidad del hormigón convencional, usado en estructuras, tiene un peso específico que oscila entre los 2200 a 2400 kg/m³, el punto de fusión del hormigón es de 1527 °C, presenta una conductividad térmica de 0.5 W/m·K, el calor específico es de 1050 J/g·K, la resistencia máxima a la tracción del hormigón es de 2 MPa, el módulo de elasticidad de Young es de 60 GPa. El precio tiene un promedio de 50 euros el metro cubico, es decir, presenta un bajo coste. [36]

Existen diferentes tipos de hormigones:

- Hormigón de Alta Resistencia: Este hormigón es más resistente en relación a sus propiedades mecánicas que el hormigón tradicional. Puede alcanzar resistencias superiores a 70 MPa, y su uso principal es para grandes estructuras. Para conseguir este hormigón se usan aditivos, principalmente se añade humo de sílice y cenizas volantes. Se caracteriza por la cantidad reducida de agua en el amasado, lo que hace que la porosidad sea muy reducida. Como consecuencia a la baja porosidad se mejora la protección a los sulfatos y la reacción árido-álcali.

- Hormigón ligero: Destaca por la reducción del peso y el gran volumen interno de huecos, gracias al empleo de áridos con una densidad baja o incorporando burbujas de gas a la masa. Esta característica aporta aislamiento térmico

No obstante, al estar formado por un gran número de huecos existe una gran pérdida de resistencia mecánica.

- Hormigón Autocompactante: Este hormigón destaca por no necesitar compactación, no requiere realizar el vibrado recién vertido. Se obtiene por la adición de superplastificante a la composición empleada para los hormigones convencionales, no obstante presentan un menor contenido de árido grueso y un mayor contenido de finos materiales.
- Hormigón Reforzado con Fibras: Los hormigones reforzados con fibra ayudan a mejorar los inconvenientes presentados por el hormigón tradicional. Estas fibras se añaden siguiendo un proceso de amasamiento y presentan resultados positivos en las propiedades mecánicas, mejorando la resistencia a la tracción y a la fatiga.

Es decir las fibras soportan los esfuerzos a tracción, ayudando a controlar la aparición de fisuras.

Existen diferentes tipos de fibras y cada una aporta unas características diferentes. Las fibras utilizadas pueden ser de tipo mineral, orgánica y metálica. Las más utilizadas son las de acero, vidrio y fibras plásticas.

Los hormigones con fibras metálicas, elevan el módulo de elasticidad 10 veces por encima a la del hormigón tradicional y presenta buena adherencia a la pasta. Principalmente se usan fibras de acero al carbono, estas aportan una mejora a la resistencia de tracción, flexión y aumenta la capacidad de adsorción de energía y control de figuración. Hay que destacar que estos hormigones son difíciles de trabajar debido a que el % en volumen puede llegar a ser elevado.

Los hormigones con fibras de polipropileno hacen que la resistencia a la flexión no aumente y que presente grandes deformaciones una vez fisurado. Ante impactos la resistencia del hormigón mejora mucho y no son atacados por los álcalis. Presenta una baja corrosión.

Los hormigones con fibras de vidrio presentan una alta resistencia a tracción y un módulo de elasticidad favorable. Son fácilmente atacados por los álcalis. La resistencia a la compresión depende mucho de la relación agua/cemento empleada.

3.4. Propiedades del Sistema de almacenamiento según el hormigón utilizado.

La temperatura máxima de trabajo que se puede alcanzar con el hormigón simple y agua circulando por su interior es de 100 °C, no obstante ya se trabaja con sistemas de almacenamiento que se aproximan a los 500 °C, esta temperatura se logra añadiendo aditivos, los cuales serán mencionados en los siguientes puntos, gracias a esto se consigue una alta conductividad térmica y alta capacidad térmica mejorando así la distribución de calor dentro de la masa de hormigón. [37]

En este apartado se estudiarán las propiedades del Sistema de almacenamiento según el hormigón utilizado, concretamente se estudiara los siguientes puntos:

- Hormigón reforzado con fibras de nylon.
- Cemento a base de aluminato de calcio para hormigones.
- Adiciones recicladas.
- Heatcrete.
- HEATEK

Es importante comentar para comprender bien los siguientes puntos que es el cemento Portland. Este cemento hidráulico cuando se mezcla con áridos, agua y fibras de acero se conforma una masa resistente denominada hormigón. Reacciona químicamente con el agua y se endurece.

Este cemento contiene los siguientes minerales:

- Oxido de Calcio (44%)
- Oxido de Silicio (14.5%)
- Oxido de Aluminio (3.5%)
- Óxidos de Hierro (3%)
- Oxido de Magnesio (1.6%)

Existen diferentes tipos de cemento Portland los cuales se mencionan en los siguientes puntos con frecuencia:

- Tipo I: Es el cemento que se utiliza en obras, este libera más calor de hidratación que otros tipos de cementos.
- Tipo II: Destinado a construcciones expuestas a la acción moderada de sulfatos, es decir, donde se requiere moderar el calor de hidratación.
- Tipo III: Tiene una alta resistencia inicial.
- Tipo IV: Este tipo de hormigón destaca porque no se producen dilataciones durante su fraguado.
- Tipo V: Se usa donde se requiere alta resistencia a la concentración de sulfatos.

3.4.1. Hormigón reforzado con fibras de nylon.

En este punto se analizará a partir de actividades experimentales realizadas en el siguiente artículo [38], los diferentes resultados obtenidos al mezclar hormigón con fibra de nylon.

En primer lugar, se consideran tres grados de árido, partículas de grava de 25 mm, grava fina de 12 mm y arena caliza con un módulo de finura de 3,5 (Experimento C). El cemento de piedra caliza utilizada es de Portland. En segundo lugar al experimento C se le añade fibras de nylon reciclado PA66 en proporciones de 0.5%, estas se obtienen de residuos de alfombras (Experimento FC). Las proporciones añadidas a cada experimento se reflejan en la siguiente Tabla 9. [38]

Tabla 9: Proporción de Nylon [38]

Mixture name	C	FC
Mixing water (kg/m ³)	97	97
Cement (kg/m ³)	280	280
Gravel (12/25) (kg/m ³) ^a	400	400
Fine gravel (8/12) (kg/m ³) ^a	200	200
Sand (kg/m ³) ^a	1000	995
Fibres (kg/m ³)	-	5
w/c ratio	0.35	0.35
Specific weight (kg/m ³)	2451	2440
Slump (cm)	0	0

Las fibras añadidas tenían una medida de 8 mm de largo, y se obtuvieron de desechos de alfombras que iban a ser desechadas en vertederos, es un compuesto que es fácil de conseguir y a un precio bajo.

Las primeras pruebas que se realizaron fueron de resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad, el experimento FC resulta ser tan fuerte como el hormigón simple, cuando se aumenta la carga de compresión, las fibras juegan un papel especial, previniendo las grietas o posponiendo el agrandamiento de estas. Es decir, el hormigón reforzado con fibras hace que se inhiba el agrietamiento del hormigón. [38]

La resistencia media a la tracción del hormigón sin la fibra de nylon es mayor, el hormigón simple tiene un comportamiento más frágil que el hormigón reforzado con fibras, se observa en la Figura 17 la capacidad de

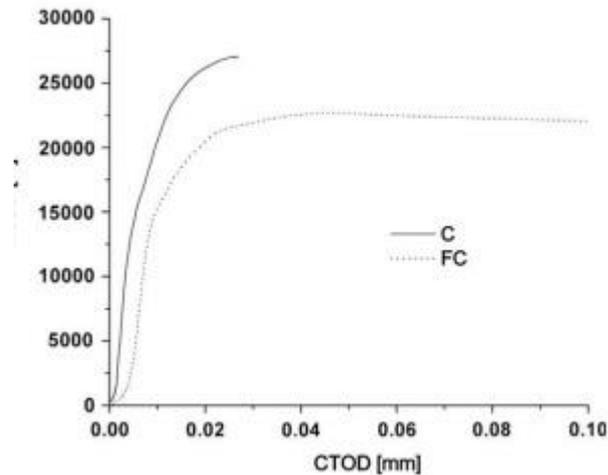


Figura 17: Curva de carga CTOD [38]

carga del hormigón simple (C) con una capacidad de carga de 24808 N y un desplazamiento de apertura de 0.03 mm aproximadamente, en cambio la capacidad de carga del hormigón reforzado con nylon expuso una capacidad de carga última de 22003 N pero un desplazamiento de apertura superior, manteniendo el desplazamiento de apertura más allá de 0.1 mm. [38]

Es decir, al usar las fibras se produce un efecto eficaz favoreciendo el puente de grietas.

En cuanto a las curvas térmicas y de flujo de calor se obtiene resultados favorables para el experimento C de los tres tipos de agregados, grava gruesa, grava fina y arena, no se detectan eventos térmicos relevantes hasta sobrepasar los 500°C, cuando la temperatura supera esa temperatura, se percibe la descomposición de los carbonatos. [38]

Tanto para el experimento C como FC, se obtiene curvas termogravimétricas y de flujo de calor similares, a 100 °C se obtiene evaporación del agua y deshidratación de C-S-H, en cambio a 140 °C de etringite e hidrato de aluminato de calcio. La descomposición de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se produce en 430 °C, los carbonatos de magnesio y calcio alrededor de los 790 °C. [38]

En la Figura 18 se muestra la capacidad calorífica promedio vs curvas de temperatura para las muestras FC y C, se observa un máximo a los 100 °C debido a la evaporación del agua absorbida por las porosidades. La muestra reforzada con fibra (FC) tiene una capacidad calorífica superior a 250 °C, gracias a las fibras de nylon (Primer escaneo). En el segundo escaneo se pierde agua y fibras, es decir se obtiene un resultado negativo. [38]

En cuanto a la conductividad térmica de los hormigones en este artículo se realiza un análisis a temperatura ambiente antes y después del tratamiento térmico, hasta los 300 °C.

Las muestras del experimento C con las que se realiza la comparación tienen una conductividad térmica inferior de 1.12 W/mk a 25 °C y 1.02 W/mk a 300 °C, en cambio el hormigón reforzado con fibra de nylon muestra una conductividad térmica de 1.3 W/mk a 24 °C y 1.16 W/mk a 300 °C. Este resultado es consecuencia a las fibras, en el resultado a temperatura ambiente hay una mayor conexión entre porosidades dejada por las fibras quemadas.

La densidad de los materiales con la temperatura depende del coeficiente de dilatación térmica, este coeficiente debe coincidir con el de la tubería del intercambiador de calor metálico. Las muestras de FC se expandieron menos que las de C, además el promedio de CTE del FC es muy similar al del acero inoxidable, que se utiliza comercialmente para la tubería.

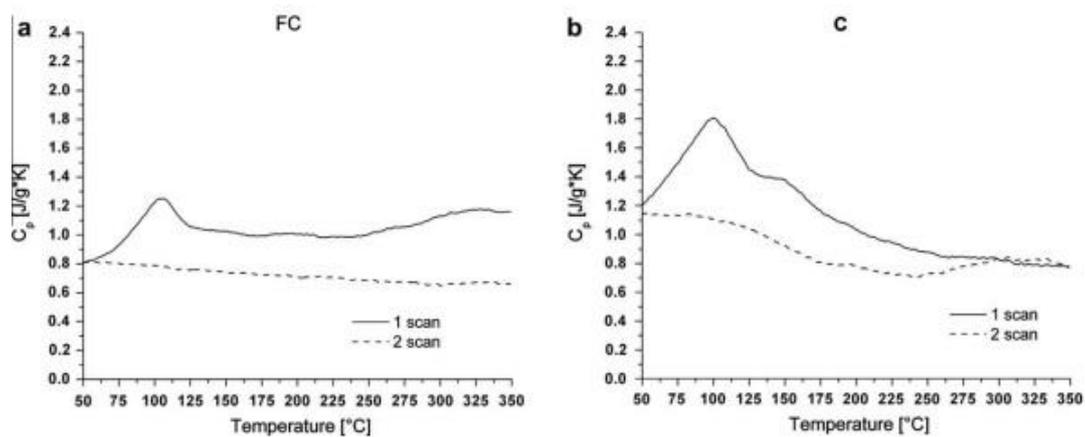


Figura 18: Calor específico frente a la muestra FC y C [38]

El hormigón en el experimento realizado en el artículo estudiado se somete a un tratamiento isotérmico en aire, esto se realiza para diferentes temperaturas, en la Figura 19 se observa el aumento de la pérdida de masa con el tiempo debido a los procesos de deshidratación. Al aumentar la temperatura se produce una pérdida de masa, debido a que a mayor temperatura el agua de las porosidades se va evaporando y posteriormente ocurre lo mismo con el agua que es combinada químicamente en los productos de hidratación del cemento. [38]

Cuando la temperatura ronda los 150 $^{\circ}\text{C}$ las pérdidas de masa en la muestra de fibra son de un 1.2% y de un 1.1% en la muestra de control (C). Esta pérdida de masa se justifica debido a que las fibras de nylon absorben agua y se liberan más lentamente.

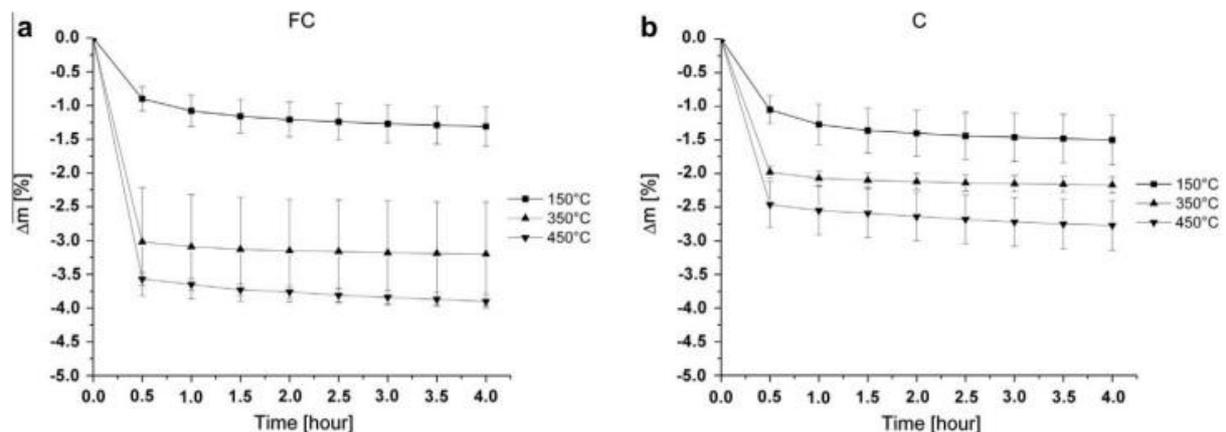


Figura 19: Variación de masa bajo tratamiento térmico. [38]

La Figura 20 expone una serie de fotografías de la microestructura del hormigón reforzado con fibra de nylon y como este evoluciona con un aumento de la temperatura. En las figuras a y b son microfografías de la muestra antes de realizar cualquier tratamiento térmico, en la primera fotográfica la sección transversal de las fibras tiene una distribución aleatoria, en cambio en la segunda fotografía (b) está tomada a mayor aumento y la sección transversal de las fibras es claramente visible. [38]

En las figuras d-f se comparan microfografías a diferentes temperaturas, empezando a 250 $^{\circ}\text{C}$, 350 $^{\circ}\text{C}$ y 450 $^{\circ}\text{C}$, se puede observar que a 250 $^{\circ}\text{C}$ (d) todavía hay restos de fibra de nylon, aunque estas se derriten cuando esta temperatura se eleva, dejando así porosidad en la mayoría de las muestras. [38]

En las fotografías e y f se observan los huecos dejados por las fibras una vez se han fundido.

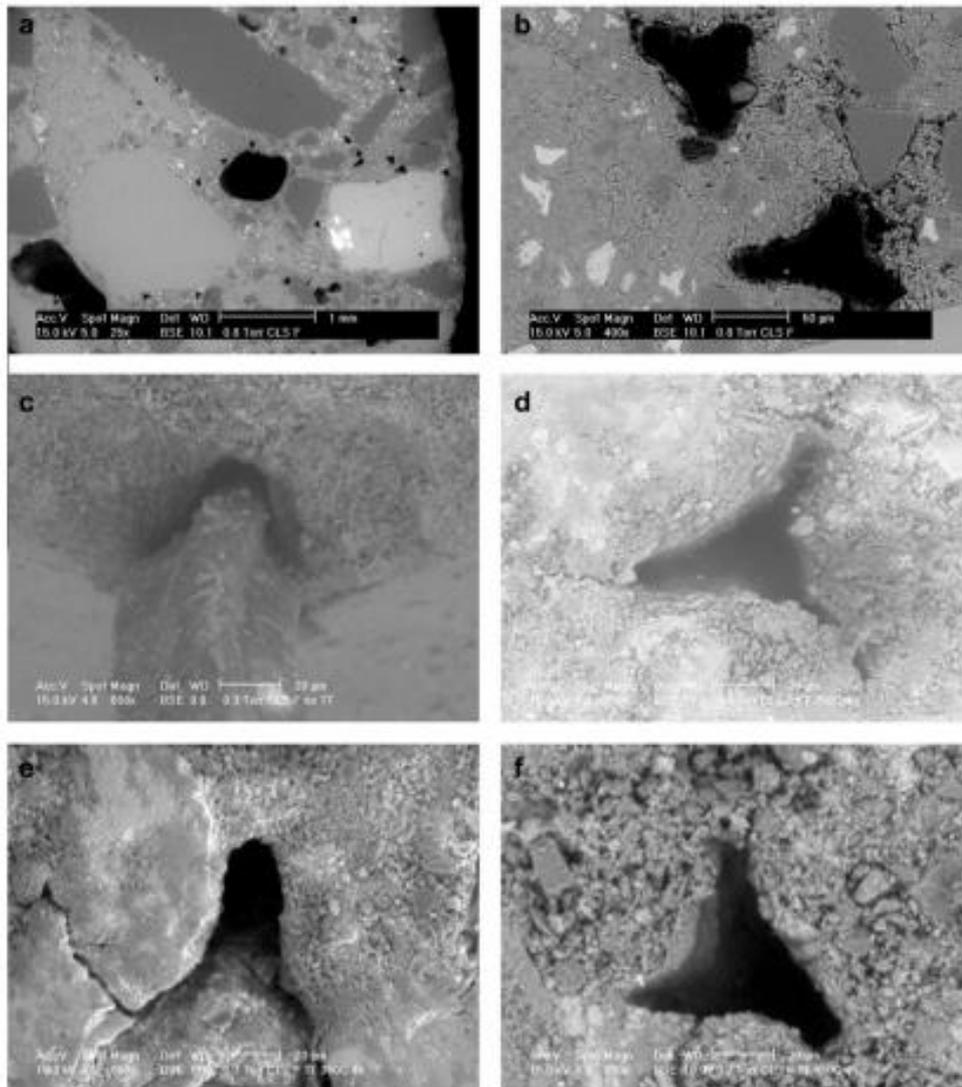


Figura 20: Muestras de FC tratadas a diferentes temperaturas. [38]

Como conclusión la fibra de nylon tiene un buen comportamiento térmico, es un buen material para realizar un refuerzo al hormigón, muestra una buena estabilidad térmica hasta 450 °C, en comparación al hormigón simple este no muestra signos de desconchado a esas temperaturas, asimismo la fusión de las fibras ayuda a prevenir la propagación de grietas térmicas. Además de ser un buen material para el almacenamiento térmico debido a sus propiedades térmicas, presenta buenas propiedades mecánicas que hacen que sea un material ideal para esta tecnología.

3.4.2. Cemento a base de aluminato de calcio.

En este caso se estudia el artículo de M.C. Alonso [37] en el cual se expone un nuevo método empleando un cemento de aluminato de calcio que contiene un 40% de alúmina y a su vez se mezcla con escoria de alto horno, con esto mejoraremos el rendimiento térmico a temperaturas elevadas. La alúmina es un óxido de aluminio que se obtiene de la naturaleza de forma pura y cristalizada, es un componente que se encuentra en abundancia y se utiliza para la fabricación de componentes cerámicos.

La mezcla utilizada en este experimento es de 70% CAC (Cemento de alúmina de calcio) y 30% BFS (Escoria de alto horno). Estos componentes están formados por los siguientes componentes químicos que se exponen en la Tabla 10.

Tabla 10: Componentes químicos CAC, BFS. [37]

	%SiO ₂	%Al ₂ O ₃	%Fe ₂ O ₃	%CaO	%MgO	%SO ₃	%Na ₂ O	%K ₂ O
CAC	4.40	40.30	15.20	37.43	0.47	0.06	0.16	0.14
BFS	36.57	10.39	0.29	45.50	7.46	0.05	0.42	0.49

Además en el artículo se estudia el comportamiento de CAC+ el cual está formado por una mezcla de 75% SCA + 25 % SSA, donde SCA es agregado calcáreo de calcita y silicio y SSA es áridos de escorias de desecho industrial

Una vez que se explican los componentes principales de este estudio se procede a comentar los resultados y comportamientos.

En primer lugar, se produce una deshidratación en la región comprendida entre los 90 y 120 °C de Al₂O₃·xH₂O. En la región comprendida entre los 120 y 200 °C se produce la deshidratación de aluminatos de calcio hexagonales. Se produce un pico endotérmico dentro de la región de 200 a 240 °C debido a la deshidratación de AH₃.

El hormigón combinado con CAC muestra deterioros a 550 °C, se produce deterioros en la resistencia de compresión hasta un 50% después de un primer calentamiento.

El resultado obtenido a las expansiones repetitivas y las contracciones que se realizan por cada ciclo favorecen a la propagación de grietas, que muestran las consecuencias a cada ciclo de calor y la estabilidad térmica que tiene el agregado.

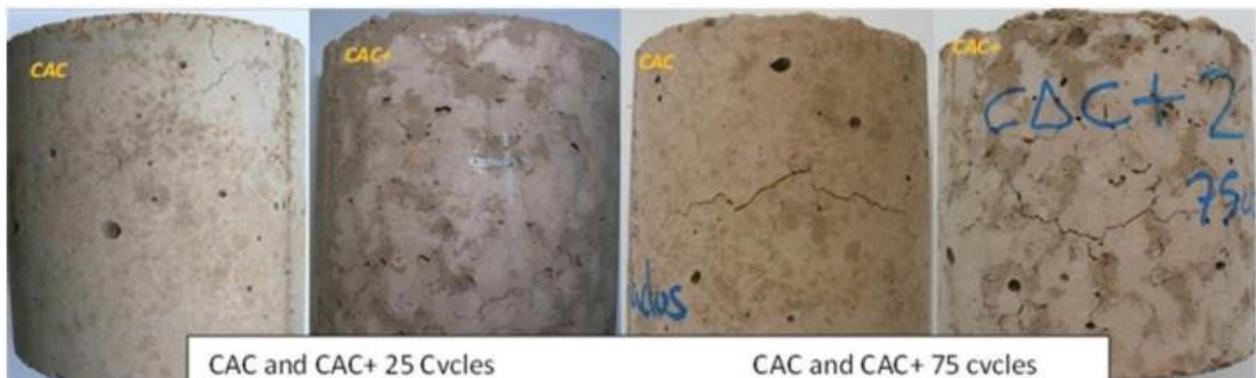


Figura 21: Cemento de aluminato de calcio [37]

Se producen importantes alteraciones de las propiedades mecánicas en compresión, flexión y elasticidad, es por ello que se debe considerar el comportamiento del hormigón durante los pre y post-calentamiento para garantizar los requisitos mínimos de rendimiento durante la vida útil.

En resumen, el hormigón con cemento de alúmina de calcio puede ser empleado para TES de 500 °C, sufre deshidrataciones a alta temperatura, estas van acompañadas de fracturas en la resistencia mecánica y microestructural.

El uso de granulometrías correctas favorece a la resistencia de ciclos térmicos a elevadas temperaturas. Se ha demostrado como desechos de SSA (áridos de escorias de desecho industrial) utilizados como agregados para hormigón hace que el rendimiento mecánico sea superior.

3.4.3. Adiciones recicladas.

Se estudia el comportamiento de dos muestras de hormigón con aditivos reciclados mencionados en el artículo [39], de este modo se observan los resultados obtenidos para exponer las propiedades principales de este punto. El primer hormigón mencionado (A), se compone por áridos reciclados, el segundo hormigón (B) se mezcla con aditivos metálicos, fibras, polvos y virutas.

La muestra A está formada por cemento Portland tipo I, superplastificante acrílico y sílice. Dentro de esta muestra se utiliza diferentes hormigones, en primer lugar el hormigón de control (C) se realiza utilizando grava de pórfido natural de $D=20\text{mm}$ y arena caliza de $FM=3.6$, en segundo lugar se sustituye el cemento natural, por áridos reciclados (CRA), estos áridos reciclados se obtienen por trituración de bloques de hormigón. De nuevo como en el apartado 3.4.1 se menciona y se estudia una muestra de hormigón con fibras de nylon recicladas de alfombras (FC), además esta última muestra se refuerza con áridos reciclado (FCRA).

La muestra B está formada por dolomita natural $D=25\text{ mm}$, grava fina $D=12\text{ mm}$, arena caliza $FM=3.5$ y cemento Portland Tipo I. Al igual que en la muestra A esta base, se utiliza para preparar los diferentes tipos de hormigones utilizados en esta muestra. En primer lugar se prepara un hormigón simple (CL), a continuación se realiza una mezcla de fibras de nylon (0.5%) y polvo metálico (1%) para producir el hormigón FPCL. Por último, se obtiene un hormigón etiquetado como SFCL a partir de 1% de fibras de acero.

Un resumen de todos los hormigones a estudiar se puede visualizar en la Tabla 11.

Tabla 11: Hormigones etiqueta A y B [39]

Label	Type A				Label	Type B			
	C	FC	CRA	FCRA		C_L [11]	FPC _L	SFC _L	FSC _L
Mixing water [kg/m ³]	215	215	215	215	Mixing water [kg/m ³]	97	97	97	120
Cement [kg/m ³]	435	435	435	435	Cement [kg/m ³]	280	280	280	340
Gravel (12/20) [kg/m ³]	758	708	179	179	Gravel (12/25) [kg/m ³]	400	400	400	
Fine gravel (8/16) [kg/m ³]			750	750	Fine gravel (8/12) [kg/m ³]	200	200	200	
Sand (0/4) [kg/m ³]	925	955	547	547	Gravel (7/15) [kg/m ³]	-	-	-	780
Silica fume [kg/m ³]	50	50	50	50	Sand (0-7) [kg/m ³]	-	-	-	780
Plasticizer	3.6	5.0	3.6	5.0	Sand (0-4) [kg/m ³]	1000	972	971	390
PA66 Fibras [kg/m ³]	-	5	-	5	PA66 Fibras [kg/m ³]	-	5	-	5
					Metallic Powders	-	77	-	-
					Steel Fibers	-	-	79	-
					Recycled Metallic Shavings	-	-	-	77
w/(c + s.f.)	0.44	0.44	0.44	0.44	w/c	0.35	0.35 (w/f = 0.27)	0.35	0.35
Density [kg/m ³]	2220	2117	2190	2092	Density [kg/m ³]	2451	2394	2365	2483
Slump [mm]	225	180	100	125	Slump [mm]	0	0	0	0
Air content [%]	5%	>7%	4%	>7%	Air content [%]	3	5	4	5

Una vez comentado las muestras que se estudian, se exponen las propiedades destacables de cada hormigón.

En primer lugar, se analizan las muestras de tipo A. Los áridos reciclados tienen un pico endotérmico a 400 °C debido a la deshidratación de la portlandita (hidróxido cálcico), un pequeño pico endotérmico a 569 °C que se debe a la transición de fase de cuarzo y un pico final atribuido a la descomposición de calcita.

La mezcla CRA y FCRA son menos fluidas y densas, tienen una mayor pérdida de asentamiento, esto se debe a la mayor absorción de agua.

En la Tabla 12 se muestra las características principales de los hormigones: peso específico, módulo de elasticidad, resistencia a la compresión, tenacidad y desplazamientos.

C y CRA tienen un comportamiento frágil en compresión, al añadir RA (Áridos reciclados) se obtiene un resultado más deformable que las muestras con agregados naturales.

Las muestras CRA, FC y FCRA, tienen una tenacidad específica media 32%, 339% y 369% respectivamente superior a C. C y CRA a baja carga presentan elasticidad y linealidad, en cambio cuando se produce un aumento de esta carga desaparece la linealidad gradualmente hasta llegar a su carga máxima que se encuentra figurada en la Tabla 12. En cambio, los áridos reciclados con mezcla de fibras se comportan de manera que la fisura y la carga mantienen una pérdida casi lineal, pero menos frágil debido a la presencia de fibras.

Tabla 12: Características hormigones tipo A [39]

	Age [days]	Specific weight [kg/m ³]	E [GPa]	f_{cm} [MPa]	R_{cm} [MPa]	Specific toughness [kJ/kN]	Toughness PL [kJ]	Toughness 0.05–0.1 PL [kJ]	Δl PL [mm]	Δl 0.05–0.1 PL [mm]
FC	28	2117 ± 52	26 ± 1	34 ± 3	41 ± 4	1.4 ± 0.1	102 ± 9	411 ± 9	0.70 ± 0.05	4.6 ± 0.8
C	28	2220 ± 15	28 ± 1	40 ± 3	48 ± 4	0.3 ± 0.1	109 ± 9	108 ± 9	0.65 ± 0.05	0.65 ± 0.05
FCRA	28	2092 ± 15	22 ± 1	36 ± 1	43 ± 1	1.5 ± 0.1	128 ± 8	456 ± 9	0.77 ± 0.05	4.6 ± 0.8
CRA	28	2190 ± 9	25 ± 1	38 ± 1	46 ± 4	0.4 ± 0.1	135 ± 9	135 ± 9	0.77 ± 0.05	0.77 ± 0.05

Las muestras de FC y FCRA son resistentes hasta los 450 °C a partir de esta temperatura se empiezan a observar desconchados, en cambio las muestras sin fibras empiezan a mostrar desconchado a 150 °C, no obstante las pérdidas de masa son inferiores a la de hormigones utilizados para aplicaciones similares. Los áridos reciclados presentan mayor pérdida de masa que el cemento simple C. FCRA y CRA tienen una buena permeabilidad a los gases, esto se debe a que los áridos reciclados son más porosos que los áridos naturales. Debido a esto, las muestras con áridos reciclados se contraen por encima de los 100 °C debido a que el vapor de agua puede salir con más facilidad, sin embargo, sin áridos reciclados presenta una expansión hasta 80 °C y contracción moderada a 150 °C.

En la Figura 22 se observa como la muestra C siempre presenta una capacidad calorífica más baja, el pico en

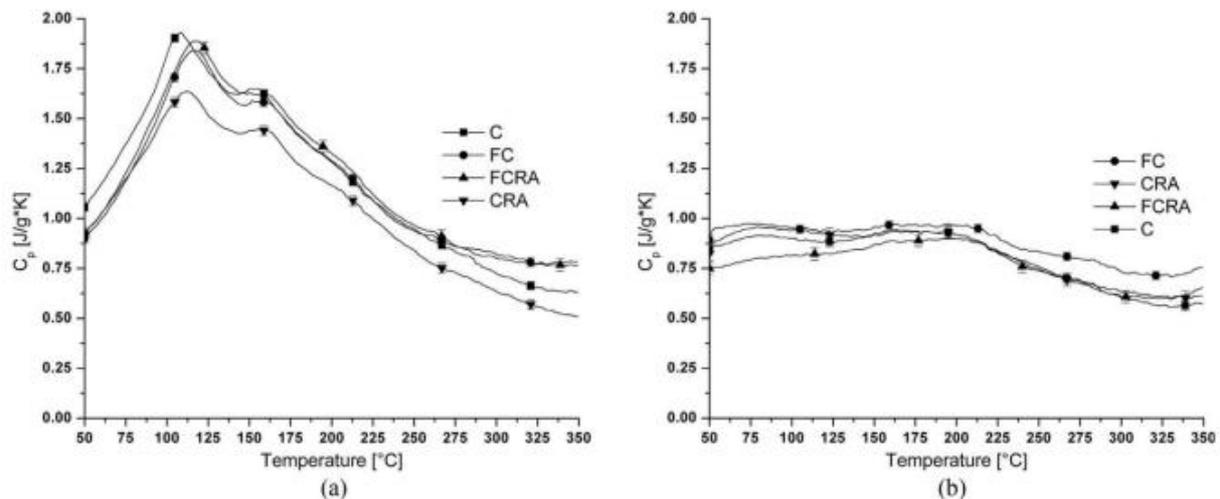


Figura 22: Calor específico frente a temperatura a) primer escaneo b) segundo escaneo

100°C es debido a la evaporación del agua, las muestras con fibra tienen una capacidad calorífica superior pasados los 250 °C. En el segundo escaneo todas las curvas presentan valores similares.

A 350 °C las micrográficas de la Figura 23 exponen grietas principalmente en las muestras que utilizan áridos reciclables, en cambio las muestras con fibras presentan resultados muy favorables como ya se explicó en los apartados anteriores.

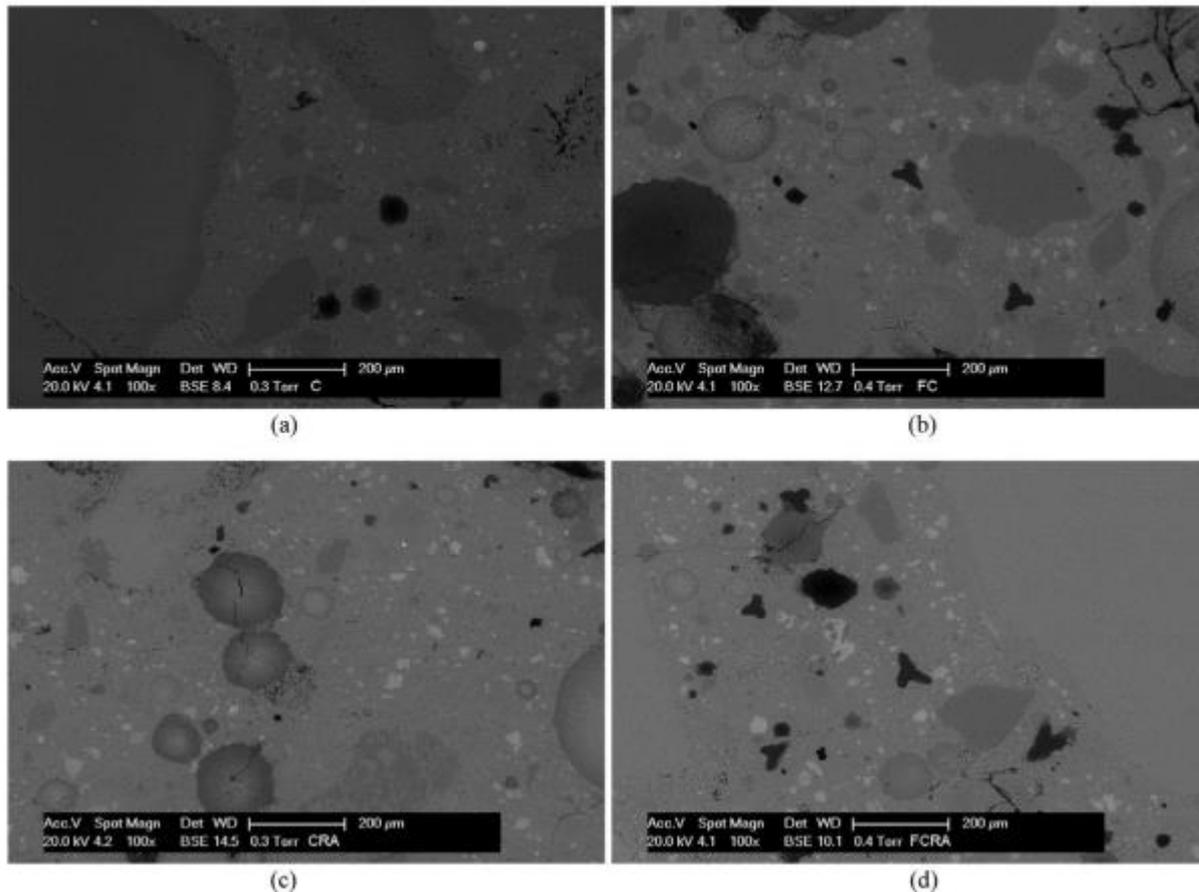


Figura 23: C (a), FC (b), CRA (c) y FCRA (d) [39]

En cuanto a las muestras de tipo B contienen una fase metálica, esto ayuda a mejorar la densidad, la conductividad térmica y la resistencia mecánica. Como es de esperar al estar compuestos por virutas metálicas, las propiedades mecánicas son superiores a las de tipo A, pasa igual con la pérdida de masa durante el tratamiento térmico en este caso las pérdidas son inferiores debido al menor contenido de agua, cabe destacar la ausencia de desconchados y de microfisuras a temperaturas altas.

Se puede observar en la Figura 24 los resultados en las micrográficas realizadas, donde tras el tratamiento a 350 °C se exponen unas pocas grietas, en FPCL y FSCL se puede apreciar agujeros en forma de trilobites, los cuales benefician la tenacidad de los hormigones, igualmente, las fibras metálicas no presentan cambios ni deformaciones a esa temperatura. No obstante, aparecen algunas grietas por contracción a 450 °C.

Como ya sabemos para un buen diseño de un sistema de almacenamiento térmico, la conductividad térmica juega un papel muy importante, esto ayudara a garantizar un ciclo rápido de carga y descarga. En la Tabla 13 se aprecia los resultados de la conductividad de los hormigones. Los hormigones de tipo B cumplen los requisitos para un ciclo completo de carga/descarga, gracias a la mezcla con metales, se logra un resultado favorable, tras

Tabla 13: Conductividad muestras. [39]

Samples	Before TT (W/mK)	After TT 300C 4 h (W/mK)
C	0.74 ± 0.04	0.53 ± 0.02
FC	0.89 ± 0.06	0.81 ± 0.03
FCRA	0.92 ± 0.05	0.91 ± 0.02
CRA	1.03 ± 0.02	1.01 ± 0.03
C _L	1.02 ± 0.02	0.99 ± 0.03
SFC _L	2.01 ± 0.01	1.73 ± 0.02
FPC _L	2.21 ± 0.01	2.01 ± 0.03
FSC _L	2.74 ± 0.11	2.13 ± 0.21

un primer ciclo se pierde los contenidos iniciales de agua, pero los metales aportan una alta conductividad,

pasado este primer ciclo. La permeabilidad del cemento es bastante buena, favoreciendo así la liberación de vapor de agua.

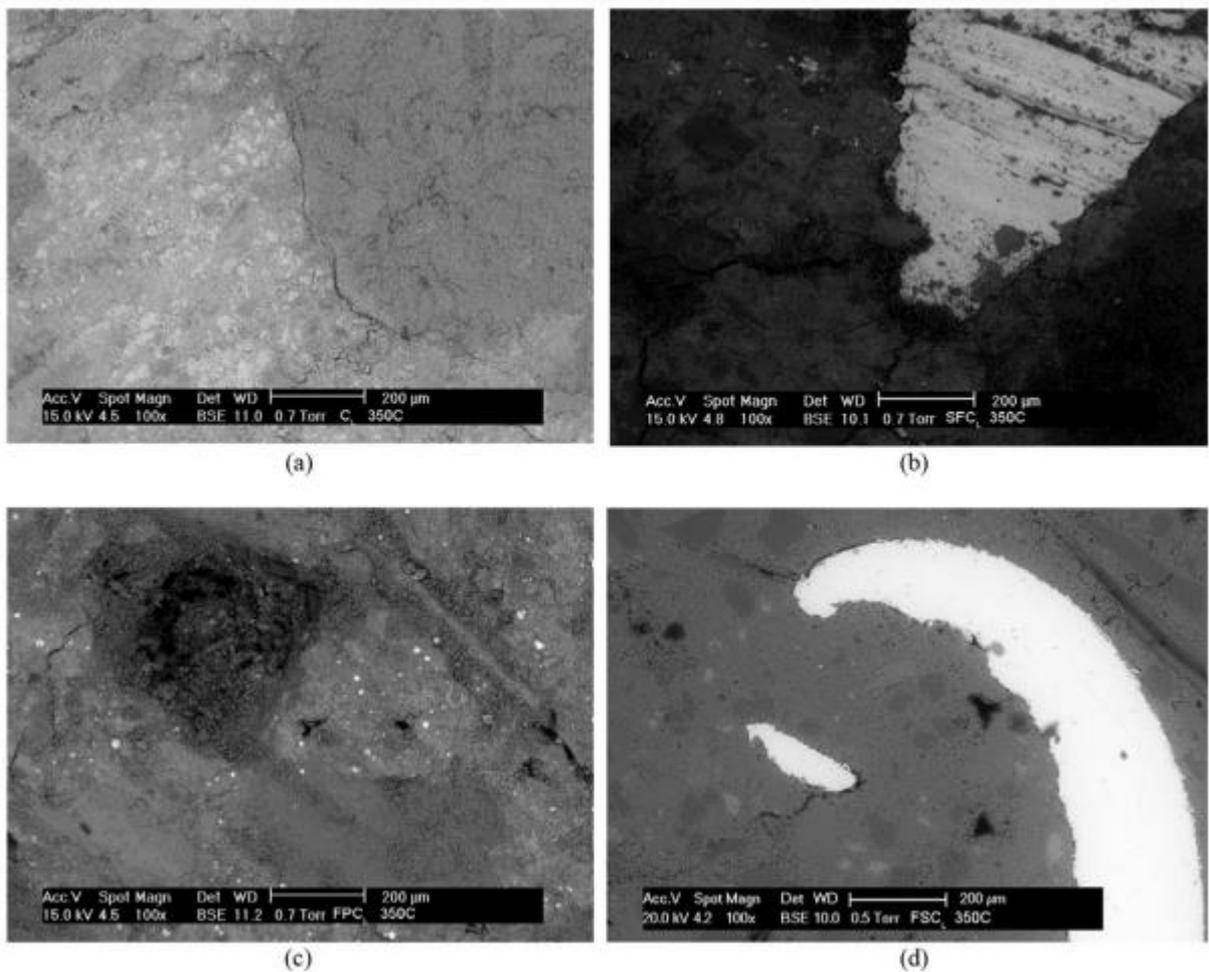


Figura 24: CL (a), SFCL (b), FPCL (c) y FSCL (d) [39]

Como podemos observar en la Tabla 14, la mejor opción para obtener un rendimiento bueno es el uso de FSCL, esté muestra puntos de mejoras con respecto a los hormigones ordinarios y hormigones de alta temperatura, tiene una conductividad térmica mayor a 2 W/mK (Tabla 14) y no presenta agrietamiento durante el ciclo térmico.

Tabla 14: Resumen propiedades Tipo A y B. [39]

		C	FC	CRA	FCRA	C _L	FPC _L	SFC _L	FSC _L
ρ^*	kg/m ³	2200	2117	2190	2092	2451	2394	2365	2483
k^*	W m ⁻¹ K ⁻¹	0.74	0.89	0.92	1.03	1.02	2.01	2.21	2.74
C_p^*	J g ⁻¹ K ⁻¹	1.06	0.93	0.93	0.92	1.20	0.69	0.77	0.89
α	m ² s ⁻¹	$3.17 \cdot 10^{-7}$	$4.52 \cdot 10^{-7}$	$4.52 \cdot 10^{-7}$	$5.35 \cdot 10^{-7}$	$3.47 \cdot 10^{-7}$	$1.22 \cdot 10^{-6}$	$1.21 \cdot 10^{-6}$	$1.24 \cdot 10^{-6}$
$k/\alpha^{0.5}$	W m ⁻² K ⁻¹ s ^{0.5}	$1.31 \cdot 10^3$	$1.32 \cdot 10^3$	$1.37 \cdot 10^3$	$1.41 \cdot 10^3$	$1.73 \cdot 10^3$	$1.82 \cdot 10^3$	$2.01 \cdot 10^3$	$2.46 \cdot 10^3$
$\alpha^{0.5}/k$	m ² K s ^{-0.5} W ⁻¹	$7.61 \cdot 10^{-4}$	$7.55 \cdot 10^{-4}$	$7.31 \cdot 10^{-4}$	$7.10 \cdot 10^{-4}$	$5.77 \cdot 10^{-4}$	$5.49 \cdot 10^{-4}$	$4.98 \cdot 10^{-4}$	$4.06 \cdot 10^{-4}$

* Measured at 25 °C.

En resumen, el hormigón FSCL formada por virutas metálicas recicladas y fibras de nylon obtenidas a partir de alfombras, soportan temperaturas de 450 °C y excedieron el límite máximo de 2 W/mK, lo que hace que sea un buen material para el uso en sistemas de almacenamiento térmico.

3.4.4. Heatcrete

Heatcrete es un tipo de hormigón que se utiliza como material para sistemas de almacenamiento de alta temperatura, se ha desarrollado gracias a la empresa NEST y se utiliza para temperaturas de 400 °C.

Este material tiene una densidad de 2364 kg/m³ y una conductividad térmica superior a los 2 W/mk, concretamente de 2.2 W/mk, esto ayuda a la velocidad de las fases de carga y descarga. En la Tabla 15 se observan las características principales obtenidas a una temperatura de 340 °C.

Tabla 15: Propiedades Heatcrete [40]

Propiedades	Heatcrete
Densidad (kg/m ³)	2364
Capacidad calorífica específica (kWh/m ³ ·K)	0.75
Conductividad térmica (W/m·k)	2.2
Iniciación de grietas	Sin grietas visibles

Este material no presenta defecto visual, cambio de color, ni grietas al someterse a ciclos térmicos de 400 °C. Se observa una ligera pérdida de masa, no obstante esta pérdida de masa se nota al comienzo de las pruebas y es debida a la fuga de vapor de agua. Se considera un material estable hasta los 400 °C. Se han aplicado test térmicos para demostrar su resistencia térmica y han resultado positivamente.

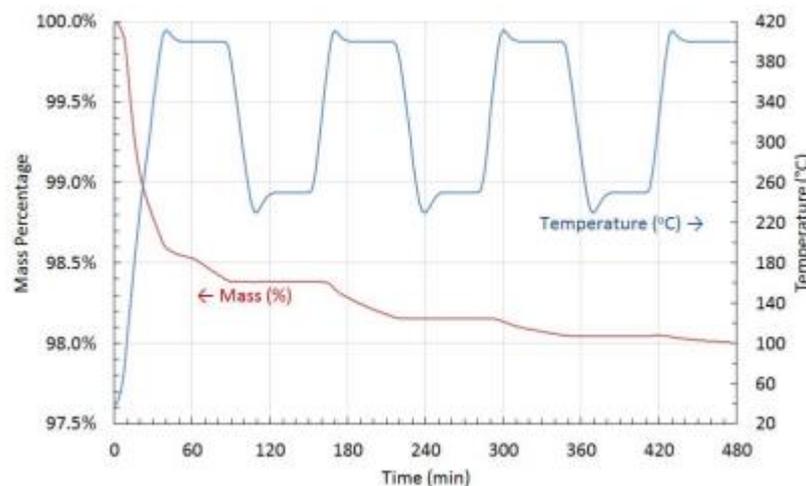


Figura 25: Pérdida de masa del material Heatcrete. [40]

Se aprecia en la Figura 25 como durante los 40 primeros minutos se produce la mayor pérdida de masa aunque las pérdidas de masas son insignificantes y se puede considerar estable hasta los 400 °C, lo que hace que sea térmicamente y mecánicamente superior a otras mezclas.

3.4.5. HEATEK.

HEATEK es una marca registrada por la industria Arraela, empresa dedicada al desarrollo de nuevos materiales y sistemas en el sector energético, radio-protección, marítimo y de alta seguridad. En los últimos años han desarrollado diferentes patentes de hormigón para la aplicación en diferentes industrias. Entre los hormigones desarrollados se encuentran los materiales de radio-protección denominados CONTEK, materiales de acumulación térmica registrada como HEATEK, materiales de uso marítimo registrado como SEATEK y SAFETEK utilizado para la alta seguridad. [41]

En este apartado se analiza el material HEATEK, se trata de un hormigón especial diseñado para captar, acumular y aislar energía. Arraela cuenta con seis materiales clasificados según su aplicación térmica. Para la captura se utiliza HEATEK RX, para los sistemas de acumulación HEATEK AC y RV y para aplicaciones de aislamiento HEATEK RC y HEATEK AI.

En este apartado se analiza HEATEK AC, RV y RC, debido a que son los materiales utilizados en el proyecto POLYPHEM y EDITOR que se analizara en los siguientes apartados. Sus principales características se pueden apreciar en la Tabla 16.

Tabla 16: Principales características de los materiales HEATEK-AC; HEATEK-RC y HEATEK-RV [44]

Main characteristics	Heatek-AC®	Heatek-RC®	Heatek-RV®
Granular material	Natural (magnetite, including FeO content)	Non-metallic urban wastes	Metallic wastes from electric arc furnaces
Density, ρ [kg/m ³]	3925	2040	3105
Specific heat capacity, c_p [kJ/kgK],	1.2-1.76	0.75-1.2	1.5-2.0
Volumetric capacity, ρc_p [kJ/m ³ K]	(100-400 °C) ~5690	(100-400 °C) ~1997	(100-400 °C) ~5434
Thermal conductivity K [WmK]	1.1-1.7	0.6-1.0	1-1.2
Cost (relative)	(100-400 °C) 10/1	(100-400 °C) 1/1	(100-400 °C) 1/1

Aditivos del hormigón:

- HEATEK-AC: Magnetita y óxido de hierro (II)
- HEATEK-RC: Residuos urbanos no metálicos.
- HEATEK-RV. Residuos metálicos de hornos de arco eléctrico.

Se aprecia como la conductividad térmica es superior en el hormigón AC y RV, esto se debe a que son materiales que están compuestos por residuos metálicos y magnetita, que hacen que este aumente. Por lo contrario, el material RC, es un material utilizado para el aislamiento, por lo tanto no interesa que la conductividad sea elevada.

Según un estudio realizado por E. Rojas [42], se obtienen los siguientes resultados para hormigón HEATEK-AC, a medida que la temperatura aumenta.

Tabla 17: Densidad y calor específico HEATEK-AC. [43]

HEATEK-AC					
	100 °C	150 °C	200 °C	250 °C	300 °C
P (kg/m ³)	3925/3980	3925/3980	3925/3980	3925/3980	3925/3980
C_p (kJ/kg·°C)	1.2	1.25	1.6	2.25	1.75

Se realiza un estudio de resistencia a la compresión y su compatibilidad con las sales térmicas a 550 °C, el

resultado obtenido es positivo. Este material es totalmente compatible con las sales fundidas a 550 °C, presenta una resistencia entre 103.6 y 72.5 MPa, en muestras que han sido sumergidas en ellas. [43]

Los resultados a este ensayo se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 18: Resistencia a la compresión del material HEATEK AC. [43]

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN		
	DENSITY (kg/dm ³)	COMPRESSIVE STRENGTH (MPa)
CURED CONCRETE	4.14	83.54
OVEN AT 450 °C	4.14	56.67
SALTS A 550 °C	4.14	108.45
SALTS AT 550 °C	4.14	107.56

HEATEK-AC presenta las siguientes características según Arrael [44], estos resultados varían según diseño y proyecto y según la temperatura de trabajo, Tabla 19.

En la Figura 26, se observa el material HEATEK-AC, durante el ensayo y al finalizar este

Tabla 19: Principales características HEATEK-AC. [43]

FLUIDOS DE INTERCAMBIO	Aceite, agua, vapor, sales fundidas y aire
Volumen	Según diseño y proyecto
Peso	Según material utilizado
Densidad	3925/3980 kg/m ³
Tiempo de carga	Depende de diseño > 3 horas
Tiempo de descarga	Depende de diseño < 350 horas
Rendimiento térmico/volumen	Entre 600 y 1630 KWh/m ³
Temperatura máxima de trabajo	700 °C
Conductividad térmica	Entre 1.13 y 1.23 W/m·K



Figura 26: Ensayo HEATEK-AC. [43]

HEATEK-RC presenta un tiempo de carga de 5 horas, para calentar el sistema hasta los 330 °C y un poco más para enfriarlo hasta los 100 °C. La muestra a estudiar se mantiene durante 2 horas a 330 °C. En la siguiente figura se observa lo mencionado.

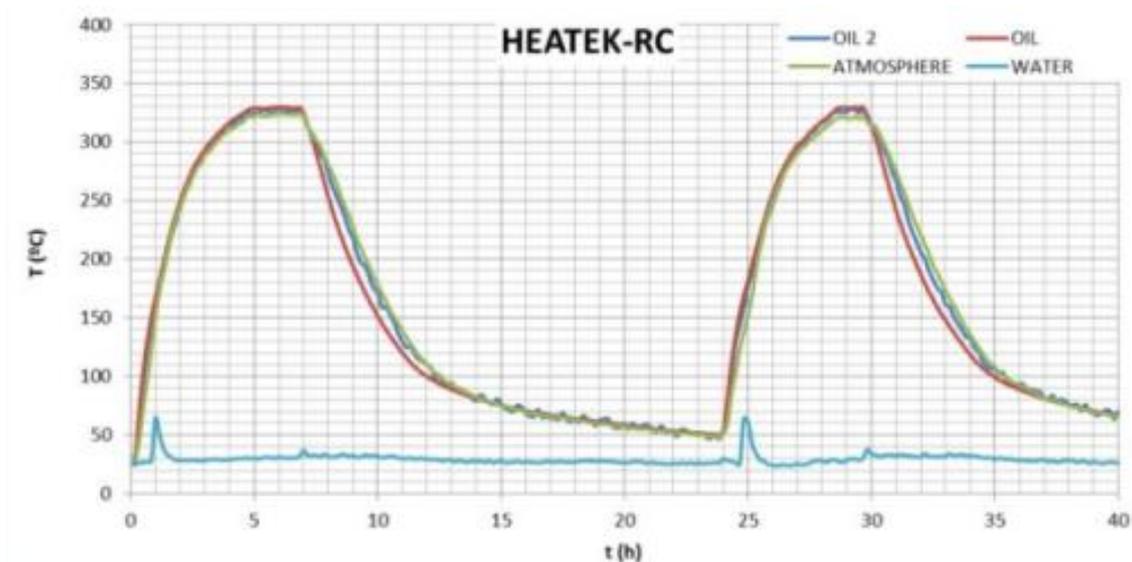


Figura 27: Ensayo HEATEK-RC primer ciclo. [42]

La resistencia mecánica para HEATEK-RC se comprende entre los 61.5 MPa a 17.9 MPa, es muy inferior a la AC, pero sigue siendo lo suficientemente alta para no presentar fallo estructurales. HEATEK-RV presenta una resistencia de 110 MPa a 87.7 MPa.

Tabla 20: Densidad y características mecánicas de las muestras. [42]

	Before/After testing	Density (kg/m ³) Before/After testing	Mechanical Resistance (MPa) Before/After testing
HEATEK-AC		3925/3980	103.6/72.5
HEATEK-RC		2040/2145	61.5/17.9
HEATEK-RV		3160/3105	110.0/ 87.7

La capacidad térmica de HEATEK-RC y RV se muestra en la siguiente tabla., donde se puede apreciar que RC tiene una capacidad calorífica superior a las demás muestras a temperatura inferior, esto se debe a que no contiene escorias metálicas.

Tabla 21: Capacidad calorífica (kJ/kg·k) [42]

	100 °C	150 °C	200 °C	250 °C	300 °C
HEATEK-RC	2.6	2.6	1.9	1.9	1.7
HEATEK-RV	0.75	0.85	0.95	1.1	1.25

En cuanto a la conductividad térmica de los tres materiales se analizan en la siguiente tabla, en ella se puede observar que se realizan dos pruebas para cada una y se analizan de 100 a 400 °C en pasos de 50 °C. Para el caso de las muestras analizadas en aceite, solo se observa hasta los 350 °C debido a que esa temperatura el aceite empieza a degradarse.

Tabla 22: Resultados de la conductividad térmica W/m·K. [42]

Mat. \ T (°C)	100	150	200	250	300	350	400
HEATEK- RV	0.98 ± 0.04	1.02 ± 0.03	1.08 ± 0.02	1.15 ± 0.02	1.23 ± 0.02	1.33 ± 0.02	1.45 ± 0.02
HEATEK-RC	0.64 ± 0.03	0.74 ± 0.02	0.82 ± 0.02	0.89 ± 0.02	0.94 ± 0.02	0.98 ± 0.02	1.00 ± 0.02
HEATEK-RC (cycled in oil)	1.02 ± 0.05	1.05 ± 0.03	1.09 ± 0.02	1.13 ± 0.02	1.18 ± 0.02	1.23 ± 0.02	--
HEATEK-AC	1.13 ± 0.04	1.23 ± 0.04	1.33 ± 0.04	1.42 ± 0.02	1.51 ± 0.02	1.59 ± 0.02	1.67 ± 0.02
HEATEK-AC (cycled in oil)	1.23 ± 0.03	1.41 ± 0.03	1.54 ± 0.03	1.62 ± 0.02	1.65 ± 0.02	1.63 ± 0.02	-

Se puede apreciar que HEATEK-RC efectivamente es un buen aislante, frente a RV y AC.

3.5. Estudio comparativo de diferentes mezclas para alta temperatura.

En el siguiente apartado se analizará y se decidirá que mezcla es la más conveniente para las aplicaciones de almacenamiento térmico, para realizar este punto con éxito nos basamos en el siguiente artículo [45], el cual es una revisión de diferentes literaturas sobre el almacenamiento de energía térmica con calor sensible. Además, se hablará sobre las mezclas analizadas en apartados anteriores y se añadirán otras nuevas a la comparativa.

Los materiales seleccionados para esta comparación han sido desarrollados y probados en la literatura para aplicaciones TES.

En primer lugar, se estudia un hormigón simple (PC), su conjunto está formado por agregados naturales, concretamente grava, arena caliza de dolomita triturada, con cemento tipo II. Además, con estos mismos materiales se estudia un nuevo conjunto de hormigón denominado FC, pero en este caso está compuesto por un 0.5% v/v de fibra sintética reciclada. Las propiedades térmicas para estas muestras se realizan a 623 K. Este ensayo se puede analizar completamente en el siguiente artículo [38], además en el punto 3.4.1 se expone y se analiza en detalle este material.

En segundo lugar, se analiza un hormigón de alta temperatura (HT) y cerámica moldeable (CC). El hormigón de alta temperatura está basado en cemento de alto horno, agregado de óxido de hierro, cenizas volantes. La cerámica moldeable está formada por un gigante que contiene Al_2O_3 puro, óxidos de hierro y un acelerador para reducir la viscosidad. Al igual que los materiales analizados en el párrafo anterior, estos se estudian a 623 K. Este ensayo se puede analizar con más detalles en el siguiente artículo [46], donde se exponen los pasos que se han realizado para obtener los resultados que se expondrán en los siguientes puntos.

Por último, se compara con un acumulador que presenta unas propiedades térmicas muy interesantes, se estudiará un hormigón de grafito (A4), que contiene materiales con una alta capacidad calorífica específica, concretamente está formado por basalto y bauxita, fibra de acero, micropolvo de aluminio, cemento de aluminato de calcio como aglutinante y 5% de grafito para fomentar la conductividad térmica. Al igual que los demás materiales, las propiedades se estudian a 623 K. Este ensayo es presentado por Guo [47].

En la siguiente Tabla 23 se recogen las características principales de los materiales mencionados en este apartado.

Tabla 23: Materiales de almacenamiento a estudiar. [45]

Material	Densidad (kg/m ³)	Capacidad Calorífica Específica (J/kg·K)	Conductividad Térmica (W/m·k)	Difusividad térmica (m ² /s)	Capacidad calorífica volumétrica (kW·h/m ³ ·K)	Referencia
PC	2451	810	1.02	5.14	0.551	[38]
FC	2440	630	1.16	7.55	0.427	[38]
HT	2750	916	1.00	3.97	0.700	[46]
CC	3500	866	1.35	4.45	0.842	[46]
A4	2680	950	2.43	9.54	0.707	[47]

En la Figura 28 se tiene una representación gráfica de las propiedades térmicas de la mezcla, el eje vertical muestra el comportamiento capacitivo del material, el eje horizontal informa sobre el comportamiento del transporte de calor y el área rectangular representa el valor de la conductividad térmica.

Una alta capacidad influye en el volumen de almacenamiento y a su vez en la densidad de potencia, una alta difusividad térmica aumenta la tasa de transferencia de calor.

De esta gráfica podemos sacar las primeras comparaciones, los materiales de almacenamiento que tiene valores aproximados de conductividad térmica, se comportan de manera muy diferente, es decir, se observa como un

aumento de la conductividad térmica no hace una mejora del rendimiento térmico general, ese aumento debe ir acompañado de otras mejoras.

También se puede observar como para un valor alto de la difusividad térmica, se obtiene un valor bajo de capacidad calorífica volumétrica. Estas dos propiedades juegan un papel fundamental, deben aumentar y para ello el diseño de la mezcla es el punto más importante.

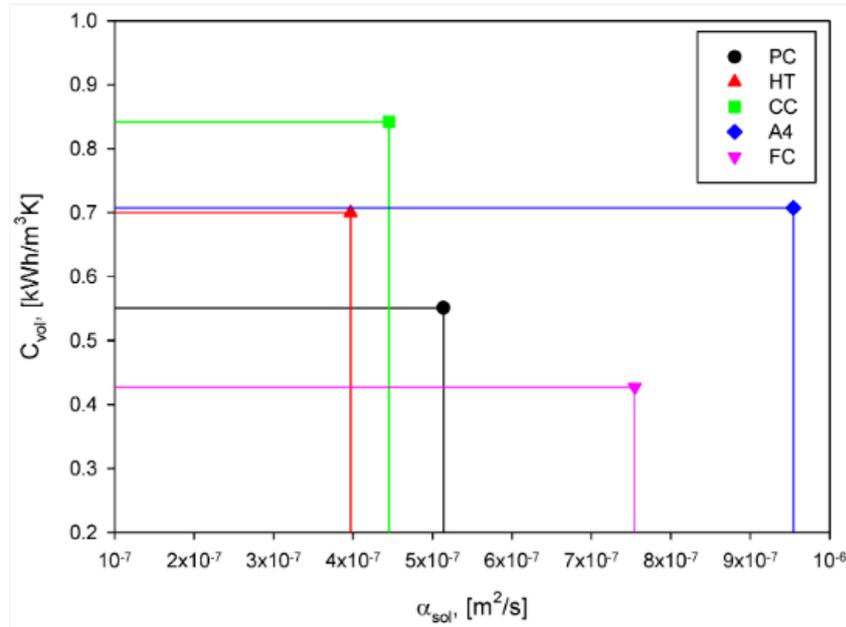


Figura 28: Comparación de mezclas a estudiar. [45]

En la Figura 29 se muestra las temperaturas medias máximas alcanzadas por los 5 materiales transcurridos 3600 s a V_{tot} constante, la fase de rotura sin pérdidas de calor y la temperatura media mínima que se alcanza durante la descarga. Cada material alcanza una temperatura máxima diferente, esto se debe a sus propiedades térmicas, A4 y FC destacan debido a que alcanzan la temperatura más alta, aproximadamente 663 K. Se observa como tienen un tiempo de carga inferior a los demás, pero también se enfrían muy rápido durante la descarga si se compara con los demás materiales. PC, HT y CC muestran un pequeño aumento de la temperatura transitoria al comienzo de la fase de descarga. Cuanto mayor sea la difusividad térmica, mejor será el perfil térmico y se logrará alcanzar una temperatura máxima superior.

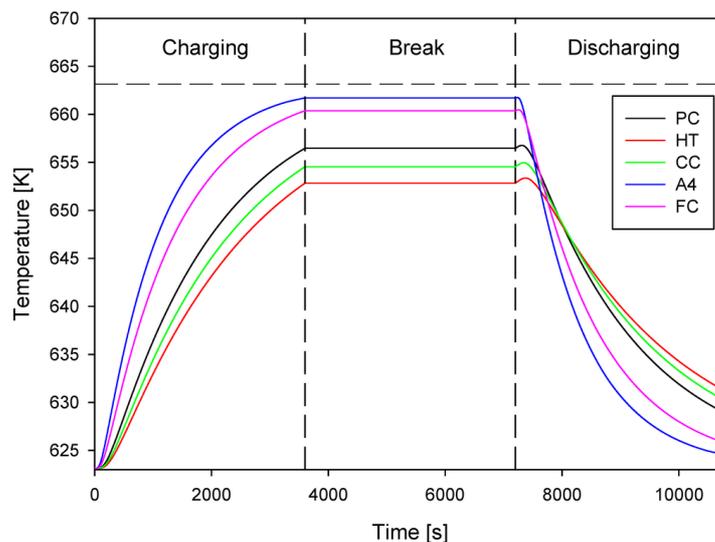


Figura 29: Temperaturas alcanzadas por las 5 mezclas transcurridos 3600 s a V_{tot} constante. [45]

Para diferentes tiempos de carga y descarga se muestra los mapas de contorno en la Figura 30, la escala de la izquierda muestra el valor de temperatura en el medio sólido a través de cuarenta tonos de color.

En la gráfica de la izquierda que muestra la fase de carga a V_{tot} constante, se observa cómo después de 60 minutos HT, PC y CC exponen varias zonas de temperatura no uniformes, debido a los gradientes internos y a la distribución de temperatura no uniforme, esto da respuesta a los aumentos de temperatura transitorios al comienzo de la fase de descarga observados en la Figura 29.

En cuanto a la fase de descarga (gráfica de la derecha) se aprecia que las mezclas FC y A4 tienen una descarga reversible.

Los resultados del análisis a V_{tot} constantes para los materiales comentados se exponen en la Tabla 24.

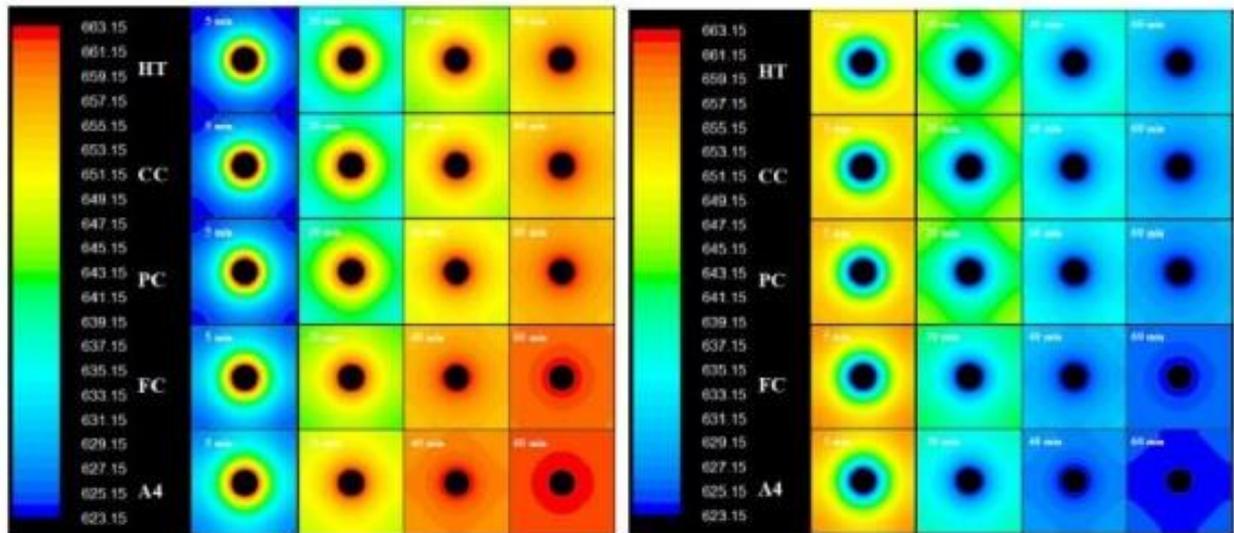


Figura 30: Mapa de contorno fase de carga (izquierda) y descarga (derecha) a V_{tot} constante. [45]

Tabla 24: Resultados experimentales para V constante. [45]

Material	M_{sol}	ΔT_{eff}	$V_{tot} \times 10^3$ (m ³)	Q_{eff} (kW·h _{th})	Q_{nom} (kW·h _{th})	$\eta_{storage}$	Volume power density (kW·h _{th} /m ³)	Power density (kW·h _{th} /ton)
PC	14.92	33.32	6.4	0.112	0.134	83.58	17.50	7.51
HT	16.74	29.69	6.4	0.126	0.170	74.12	19.69	7.53
CC	21.30	31.39	6.40	0.161	0.205	78.54	25.16	7.56
A4	16.31	38.56	6.40	0.166	0.172	96.51	25.94	10.18
FC	14.85	37.23	6.40	0.097	0.104	93.27	15.16	6.53

PC y FC tienen el peso más bajo, esto se debe a su baja densidad, de ese modo CC presenta el peso más alto, observando la Tabla 24 vemos los valores de esta propiedad. Los valores de la energía efectiva y la energía nominal dependen de la capacidad calorífica específica, se observa que CC tiene la capacidad más alta, de ese modo presenta un valor superior, en cambio FC le ocurre lo contrario.

Apreciamos como al aumentar la difusividad térmica a volumen constante, el rendimiento del almacenamiento también aumenta. PC, HT y CC tienen una eficiencia muy baja, para lograr aproximarse a las demás muestras

se debería considerar un tiempo de carga más prolongado.

En la Figura 31 se muestra el perfil de temperatura para Q_{nom} constante, el hormigón A4 en los dos casos tuvo resultados muy favorables. CC y HT mejoraron su comportamiento térmico en comparación con el caso anterior. FC disminuye su comportamiento dinámico y destaca por ser el peor perfil.

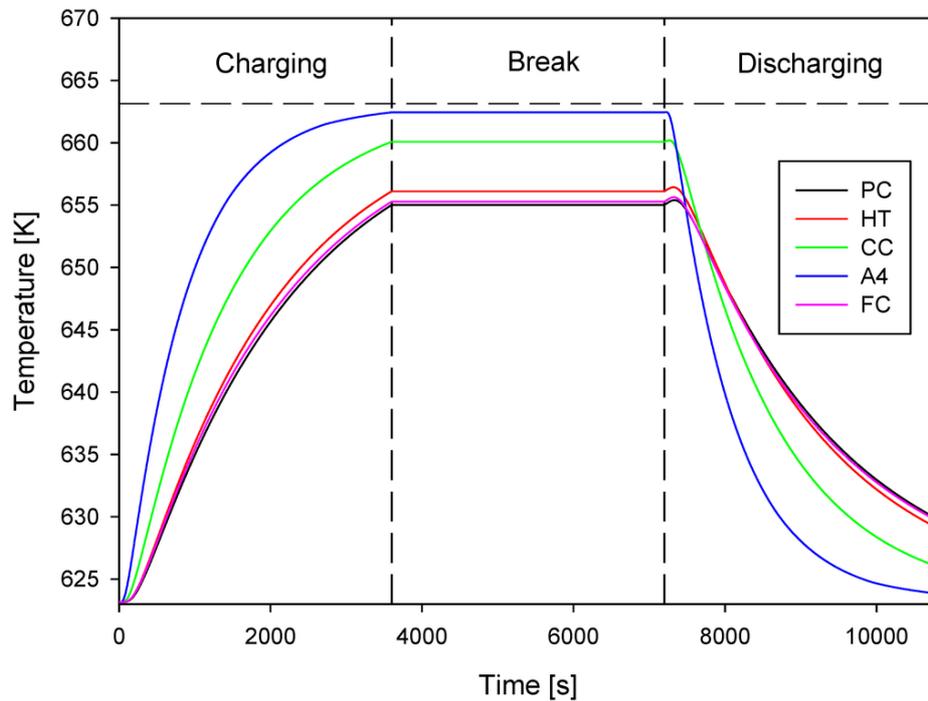


Figura 31: Perfil de temperatura para Q_{nom} constante. [45]

A4 destaca por tener el peso total más bajo y la densidad más elevada, también presenta buen comportamiento transitorio, la capacidad calorífica no es elevada, pero la alta conductividad que presenta se debe a ΔT elevada. Además, A4 muestra que tiene un diseño de mezcla muy equilibrado y un comportamiento térmico transitorio muy bueno para su función. La explicación de que FC presente los resultados más negativos se exponen en la Tabla 25, donde se registran valores de peso y volumen más altos, debido a su baja capacidad calorífica específica y densidad.

Tabla 25: Resultados principales para Q_{nom} constante. [45]

Material	M_{sol}	ΔT_{eff}	$V_{tot} \times 10^3$ (m ³)	Q_{eff} (kW·h _{th})	Q_{nom} (kW·h _{th})	$\eta_{storage}$	Volume power density (kW·h _{th} /m ³)	Power density (kW·h _{th} /ton)
PC	16.11	31.87	6.88	0.116	0.145	80.00	16.86	7.20
HT	14.25	32.96	5.50	0.120	0.145	82.76	21.82	8.42
CC	15.07	36.93	4.62	0.134	0.145	92.41	29.00	8.89
A4	13.74	39.30	5.44	0.142	0.145	97.93	26.10	10.33
FC	20.71	32.13	8.80	0.116	0.145	80.00	13.18	5.60

En la Figura 32 se observan los mapas de temperatura de contorno para la fase de carga (derecha) y descarga (izquierda).

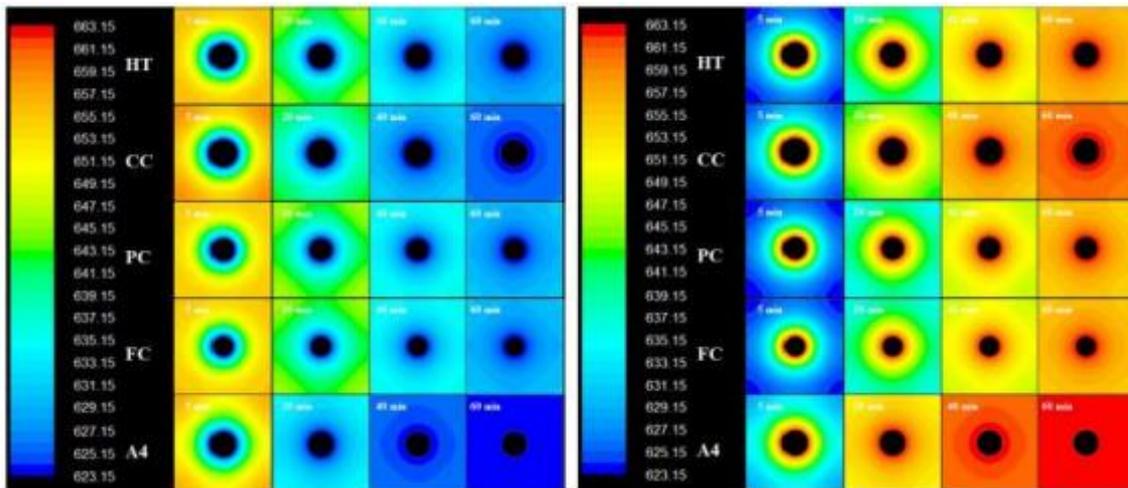


Figura 32: Mapa de contorno de temperatura para Q_{nom} constante, Carga (derecha), Descarga (Izquierda) [45]

A4 y CC presentan una distribución de temperatura más uniforme que PC, HT y FC durante la fase de carga debido a una lenta respuesta a un cambio rápido de temperatura.

Se comprueba una descarga completa de A4 y una descarga reversible casi completa para CC. Al igual que en el caso anterior se aprecia una transferencia de calor más lenta para PC, HT y FC.

3.5.1. Comparación de hormigón geopolimérico y diferentes porcentajes de agregados plásticos.

Este estudio se basa en la comparación de 5 mezclas de hormigones, 4 de ellas con diferentes agregados plásticos y por otro lado una mezcla de hormigón geopolímero, se sigue analizando el artículo [45]. En la Tabla 26 se exponen los componentes de cada una de ellas, (PA hormigón convencional y G hormigón geopolímero). Se utiliza superplastificante según la cantidad de agregados plásticos, es decir, a mayores agregados plásticos, mayor cantidad de superplastificante, de este modo mejoramos la trabajabilidad de la mezcla.

Tabla 26: Proporción de mezcla. [45]

Material	Unidades	PA ₀	PA ₁₀	PA ₂₀	PA ₃₀	G
CEM II/A-L 42.5R	kg/m ³	300	300	300	300	-
Lodo de mármol	kg/m ³	146	152	171	183	-
Piedra caliza triturada	kg/m ³	1648	1351	1227	1101	854
Agregado plástico	kg/m ³	0	70	140	210	-
Ceniza	kg/m ³	90	90	90	90	208
Solución alcalina	kg/m ³	-	-	-	-	138
Superplastificante	L/m ³	6.86	7.26	8.92	9.95	-
Relación w/c	-	0.5	0.5	0.5	0.5	-

Las propiedades térmicas para estos materiales se pueden visualizar en la Tabla 27, se puede destacar la disminución de la densidad y conductividad térmica, esto se debe a las cantidades de plástico, en cambio su capacidad calorífica aumenta. G muestra una capacidad calorífica específica y una conductividad térmica altas, en cambio la densidad es bastante inferior a las diferentes muestras.

Tabla 27: Propiedades térmicas materiales a estudiar. [45]

Mezcla	Conductividad térmica (W/m·k)	Densidad (kg/m ³)	Capacidad calorífica específica (J/kg·k)
PA ₀	1.42	2094	722
PA ₁₀	1.18	1914	743
PA ₂₀	0.94	1762	766
PA ₃₀	0.71	1518	789
G	1.01	1811	751

En la siguiente gráfica (Figura 33 se observan las propiedades térmicas de los materiales, se aprecia como la conductividad térmica disminuye a medida que aumenta la cantidad de plástico, pero esa baja densidad hace que la difusividad térmica sea mayor que en el apartado anterior.

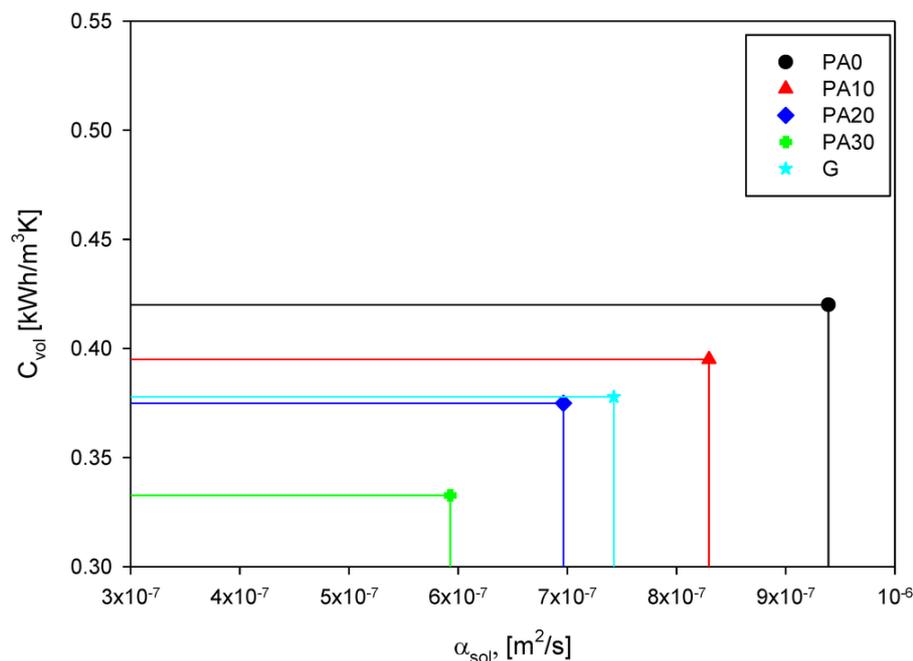


Figura 33: Propiedades térmicas de los materiales. [45]

A temperatura ambiente el hormigón geopolimérico presenta una resistencia a la compresión de 21.70 MPa y pasados 8 ciclos a 423 K se mantiene en un valor próximo, concretamente en 20.34 MPa. No se aprecian síntomas de desconchado debido a su bajo contenido en agua. Tras someter la prueba al tratamiento térmico de 723 k, no se observan desconchados y la resistencia a la compresión disminuye hasta los 15 MPa.

Los resultados del análisis a V constante se exponen en la Tabla 28, donde los resultados son similares, aunque cabe destacar que se produce una disminución del rendimiento debido a que ΔT disminuye como consecuencia

a la cantidad de agregados plásticos.

Tabla 28: Características principales nuevos materiales. [45]

Material	M_{sol}	ΔT_{eff}	$V_{tot} \times 10^3 \text{ (m}^3\text{)}$	$Q_{eff} \text{ (kW} \cdot \text{h}_{th}\text{)}$	$Q_{nom} \text{ (kW} \cdot \text{h}_{th}\text{)}$	$\eta_{storage}$	Volume power density $\text{(kW} \cdot \text{h}_{th}\text{/m}^3\text{)}$	Power density $\text{(kW} \cdot \text{h}_{th}\text{/ton)}$
PA ₀	12.74	38.49	6.40	0.098	0.102	95.86	15.31	7.69
PA ₁₀	11.65	37.87	6.40	0.091	0.096	94.63	14.22	7.81
PA ₂₀	10.72	36.58	6.40	0.083	0.091	90.94	12.97	7.74
PA ₃₀	9.24	35.02	6.40	0.071	0.081	87.66	11.09	7.69
G	11.02	37.11	6.40	0.085	0.092	92.42	13.28	7.71

Los perfiles de temperatura a V constante son muy similares como se puede observar en la Figura 34, debido a que sus propiedades térmicas son prácticamente las mismas.

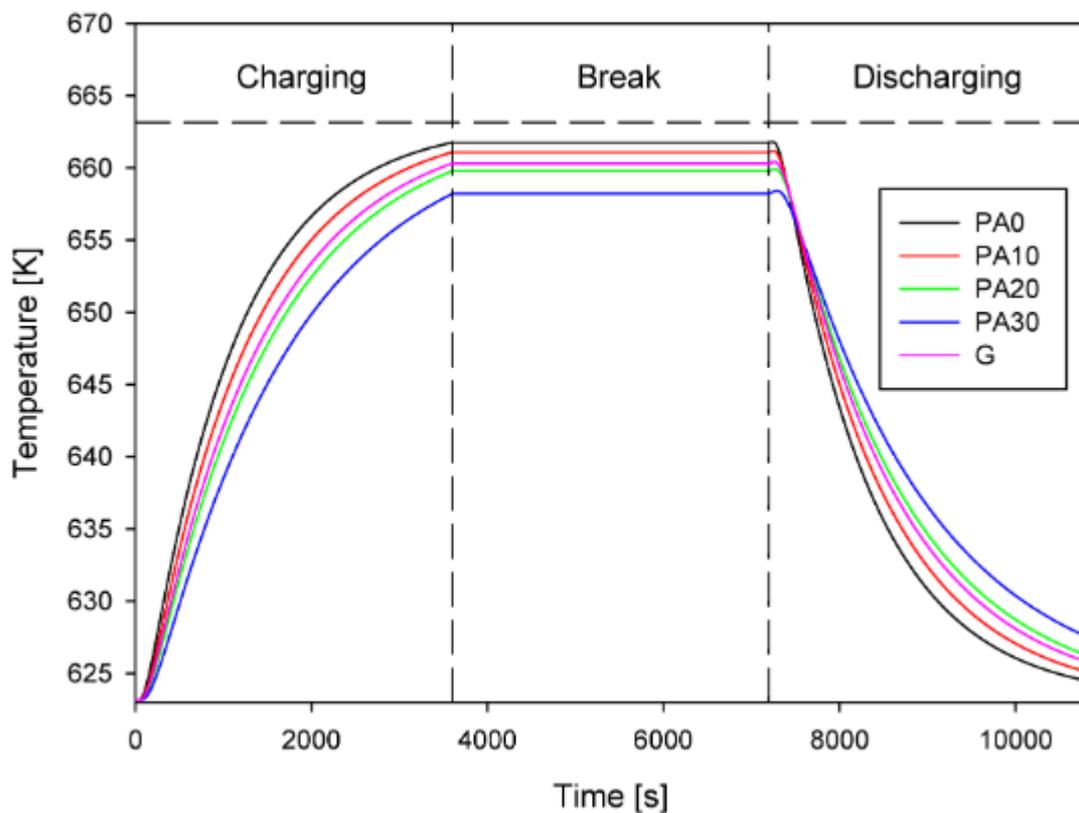


Figura 34: Perfil de temperatura a V constante. [45]

Los mapas de temperatura de contorno Figura 35 muestran que la mezcla G exhibe un avance temporal del contorno de temperatura entre PA₁₀ y PA₂₀. PA₀ tiene una alta difusividad térmica, es por ello que tiene un comportamiento dinámico, pero al contener grandes cantidades de material plástico se produce un empeoramiento del comportamiento térmico.

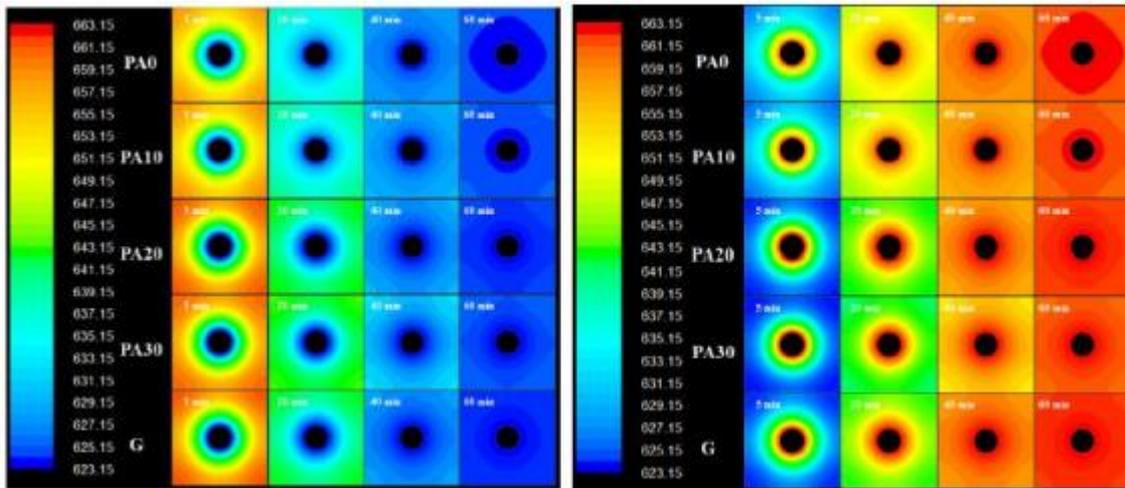


Figura 35: Mapa de contorno, fase de carga (derecha), fase de descarga (izquierda). [45]

3.5.2. Conclusión del estudio comparativo.

Cuando se realiza una simulación a V constante se aprecia como PC aporta mejores rendimientos, que los materiales CC y HT. Cabe destacar que el material A4 tiene los mejores rendimientos, con una eficiencia de almacenamiento de calor de 96.51% a V constante y 97.93% a Q nominal constante, además la densidad de potencia es la superior y como consecuencia el peso del material es el menor.

No nos podemos basar solo en el valor de la conductividad térmica para la elección de un buen material, se necesita un análisis térmico para apreciar el comportamiento dinámico y se precisa de un equilibrio entre el comportamiento capacitivo y el de transferencia de calor.

Se ha demostrado que con los materiales preparados se consigue reducir el peso del material y elevar la capacidad calorífica específica. Un uso elevado de agregados plásticos empeora el comportamiento del material, se debe usar un porcentaje que se encuentre en un rango entre 10 y 20% de agregado.

En conclusión el hormigón geopolímero presenta unas características adecuadas para sustituir al hormigón convencional y utilizarlo como medio de almacenamiento.

3.6. Conclusión.

En este apartado se analizarán todos los puntos destacados de los Sistema de almacenamiento en hormigón.

Se concluye, que el modelo más óptimo sigue la geometría de la Figura 10, es decir, una geometría triangular, debido a que la distribución de temperatura es más favorable. El tubo usado en el intercambiador de calor con el resultado más satisfactorio tanto por razones económicas como térmicas, es el intercambiador de tubo liso. Se observó, como el tubo de espiral presenta buenos resultados térmicos, debido a que realizan una mejor distribución de calor en el hormigón, pero el coste del sistema aumenta considerablemente.

El material usado en los tubos debido a que presenta una buena transferencia de calor es el acero. Vimos como el principal inconveniente de usar acero junto con hormigón, era el coeficiente de expansión térmica, que produce grietas. No obstante, si se aplican materiales entre el intercambiador y el hormigón este inconveniente desaparece. Los materiales adecuados para evitar este problema son el Teflón, Deacon y papel de aluminio.

El subconjunto intercambiador de calor y hormigón hacen que este sistema de almacenamiento sea muy económico, debido al bajo coste de estos dos materiales. Además, presentan una alta disponibilidad y son fáciles de procesar. Es por ello que esta tecnología está creciendo tanto en la actualidad. En el siguiente punto se pueden apreciar las aplicaciones de algunos de estos materiales en la industria y en proyectos pilotos, donde se exponen resultados positivos.

Se procede a realizar un estudio de todos los materiales estudiados en este apartado y se deducirá cual es el mejor para aplicaciones de TES. Para ello se expondrán en la siguiente tabla todos los materiales, junto con su conductividad térmica y su calor específico.

Material	Conductividad térmica (W/m·K) 350 °C	Capacidad Calorífica Específica (J/kg·K) 350 °C
PC	1.02	810
FC	1.16	630
HT	1.00	916
CC	1.35	866
A4	2.43	950
PA ₀	1.42	722
PA ₁₀	1.18	743
PA ₂₀	0.94	766
PA ₃₀	0.71	789
G	1.01	751
HEATEK-AC (300 °C)	1.59	1750
HEATEK-RC (300 °C)	0.98	1700
HEATEK-RV (300 °C)	1.33	1250
HEATCRETE (340 °C)	2.22	1142
FSCL	2.74	890
FPCL	2.21	690
SFCL	2.01	770

Se observa que los peores resultados se han obtenido para PC (Hormigón simple), HT (hormigón de alta temperatura), PA (hormigón con altos contenidos plásticos), G (hormigón geopolímero, obtenidos de residuos industriales como cenizas volantes), y HEATEK-RC (formado por residuos urbanos no metálicos). Es decir, se concluye que el uso de plásticos en porcentajes altos conlleva a una baja conductividad térmica. Estos materiales los descartaría para el uso en sistemas de almacenamiento de alta temperatura, ya que según Laing [35], el rango de conductividad térmica para materiales de almacenamiento se recomienda que estén 1 y 2 W/m·K.

Hay que buscar un equilibrio entre la capacidad calorífica específica y la conductividad térmica, mientras mayor capacidad calorífica, mayor es la capacidad de almacenamiento por tanto es necesario menos volumen. Mientras mayor sea la conductividad térmica, mejor transferencia de calor se produce de ese modo, la carga y descarga es más rápida.

En primer lugar, vamos a analizar la conductividad térmica de estos materiales y a continuación se hará un

análisis de la capacidad térmica para deducir cuál de estos materiales es el más adecuado para los TES.

Como era de esperar los aditivos plásticos hacen que la conductividad térmica disminuya, pero estos favorecen a algunas propiedades mecánicas, como puede ser el puente de grietas y al coeficiente de dilatación térmica, que se asimila más al del acero. Si se utilizan porcentajes no elevados de fibras de plástico (se debe usar un porcentaje que se encuentre en un rango entre 10 y 20% de agregado), este es un material ideal.

Los hormigones a base de aluminato de calcio presentan buenos resultados y pueden ser empleados en TES hasta 550 °C. Si lo comparamos con hormigones con aditivos de fibra de nylon que pueden llegar hasta 450 °C sin presentar defectos y con aditivos reciclados como puede ser FSCL (fibras de poliamida reciclada y virutas metálicas), que al igual que FC pueden alcanzar los 450 °C, descartaría el hormigón a base de fibra de nylon. Es cierto, que presenta buenas propiedades mecánicas y térmicas, pero la combinación de fibras de plástico y metálicas como puede ser FSCL o el uso único de fibras metálicas, hace que la transferencia de calor mejore, solo hay que apreciar la conductividad térmica que presentan. Otro candidato es A4, elaborado a partir de cemento de aluminato de calcio (junto con basalto, fibra de acero, micropolvo de aluminio y grafito), presenta mejores resultados térmicos que un hormigón con únicamente aditivos plásticos. Es decir, los materiales con mejor conductividad térmica contienen fibras metálicas.

Analizando la capacidad calorífica específica observamos que las marcas registradas presentan los resultados más positivos, en concreto HEATEK-RC, pero al tener una conductividad muy baja, este material se descarta.

No obstante, tanto HEATEK-AC, HEATEK-RV y HEATCRETE, tiene una buena relación entre la conductividad térmica y la capacidad calorífica, lo que hace que sean los mejores candidatos para su uso en sistemas de almacenamiento térmico.

En cuanto a la resistencia y propiedades mecánicas, se ha observado como todos han presentado buenos resultados hasta temperaturas de 450 °C.

4 LA INDUSTRIA Y LOS SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA EN HORMIGÓN

Las energías renovables son las actuales protagonistas del sistema eléctrico, como se comentó en la introducción de este trabajo, el almacenamiento de energía a gran escala está en el foco de mira para que esta energía limpia sea viable de manejar.

Es por ello que grandes empresas como Siemens Gamesa Renewable Energy, EnergyNest, SolidTes, Engie SA, el gigante suizo de cemento Holcim, CADE Soluciones de Ingeniería y el Instituto de Investigación de Energía Eléctrica (EPRI) entre muchas otras, se están interesando por esta tecnología

El objeto de estudio del presente apartado es realizar una recopilación de diferentes prototipos plasmados por algunas de las empresas mencionadas con anterioridad.

4.1 EnergyNest.

El sistema de EnergyNest tiene un diseño en el cual los intercambiadores de calor utilizan elementos térmicos colocados en serie y paralelo en un marco, pueden almacenar energía a temperaturas en el rango de más de 400 °C. Es modular, escalable, los materiales de los cuales está formada su geometría son abundantes, reciclables y no peligrosos. El rendimiento de esta batería térmica es bastante favorable y las capacidades oscilan entre MWh y GWh. [48]

Los elementos térmicos tienen una geometría cilíndrica con una carcasa de acero de espesor delgado concretamente de 0.4 mm, se encuentra cerrada por un extremo y abierta en el otro, dentro de este sistema se encuentra el medio de almacenamiento Heatcrete, el cual explicamos con anterioridad en el punto 3.4.4.

En el interior del hormigón Heatcrete se encuentran intercambiadores de calor de tubos de acero integrados (Figura 37, primera imagen). Todo el conjunto forma un módulo de batería térmica (Figura 37, segunda imagen), cada módulo se puede conectar hidráulicamente con otros para formar una batería térmica (Figura 37, tercera imagen). En la Figura 36 se observa el esquema del intercambiador de calor de tubos mencionado.

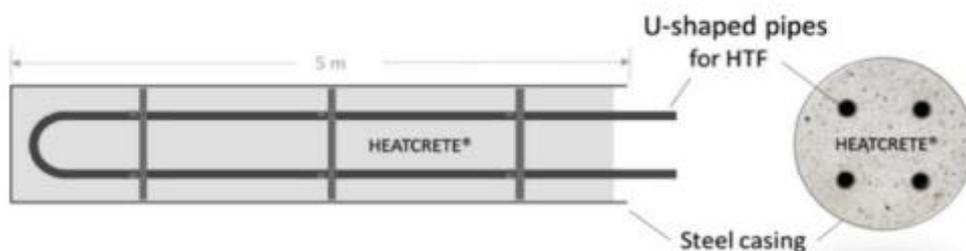


Figura 36: Diseño elemento térmico EnergyNest. [49]

Se compone por dos tuberías configuradas en paralelo y en forma de U. Estas tuberías están configuradas de tal forma que el HTF fluye dentro, a través de dos tubos paralelos en forma de U. La diferencia de temperatura del fluido caloportador que entra y sale del elemento térmico es muy bajo durante las fases de carga y descarga, esto hace que se produzca un gradiente mínimo de tensión termodinámica en la dirección axial, debido a que el gradiente dominante sigue una dirección radial

Cuando se produce la fase de carga el fluido térmico caliente fluye de arriba hacia abajo por las tuberías, de este modo se transfiere energía térmica al material de almacenamiento.

La energía se almacena con una mínima pérdida de calor hasta que se necesita.

En la fase de descarga, el flujo toma sentido inverso y el fluido térmico sale caliente por la parte superior de la batería térmica.

El diseño de este sistema se puede apreciar en la Figura 36, se observa que el diseño del sistema deja como resultado una relación superficie/volumen más favorable en comparación con los grandes bloques de hormigón que se han revisado en este trabajo. Esto favorece a mejorar las pérdidas térmicas generales.

Se aprecia como las baterías térmicas están compuestas por varios módulos diseñados especialmente para facilitar el transporte y el posterior montaje.

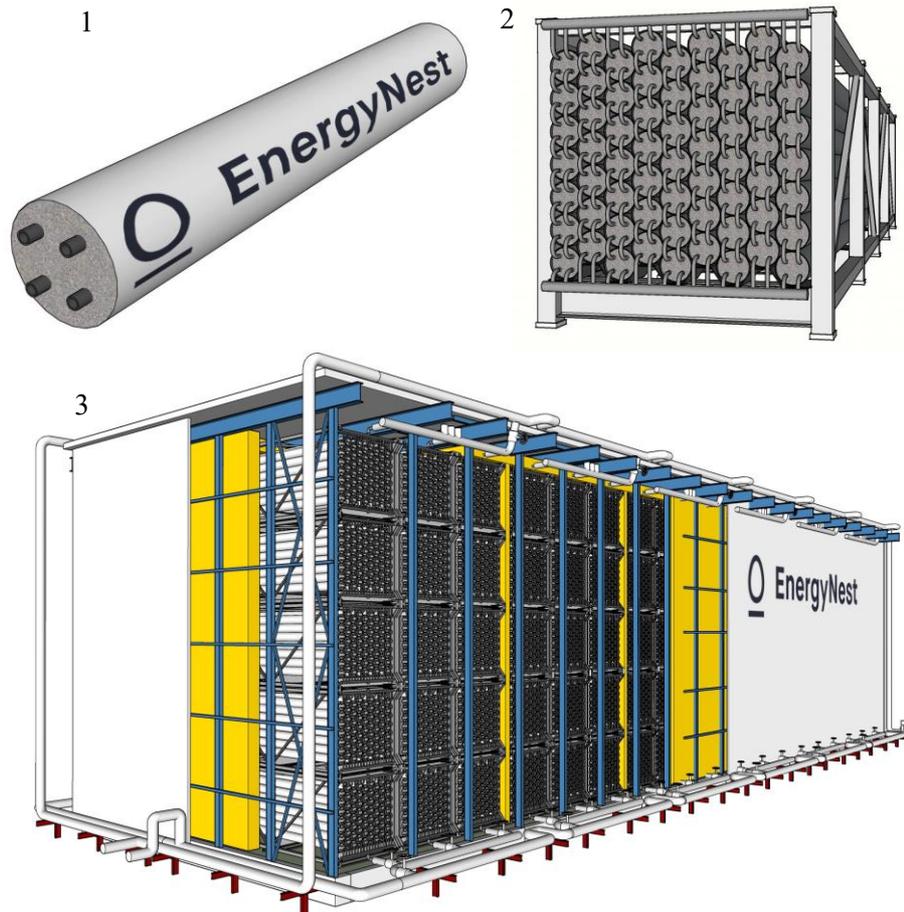


Figura 37: Elementos principales del sistema de almacenamiento térmico de EnergyNest. [48]

4.1.1 Proyecto Masdar.

En 2015 EnergyNest junto con MISP instalaron y ejecutaron un proyecto piloto de una batería térmica con una capacidad combinada de $1 \text{ MWh}_{\text{th}}$, concretamente dos baterías de $500 \text{ kWh}_{\text{th}}$ basadas en este nuevo diseño. Este proyecto se realizó en Abu Dhabi en la plataforma solar de MISP. En este proyecto colaboraron empresas como SIEMENS, DOW Chemical, Instituto Masdar, DNV GL y Fichtner. [48] Cabe destacar que el montaje del sistema de almacenamiento térmico se llevó a cabo en 6 meses.

El sistema opero con un perfil de ciclos de energía similares al funcionamiento de una central eléctrica, funcionaba 24 h / 5 días. Las pruebas se realizaron con un circuito de aceite y contaba con un calentador eléctrico de 100 kWe para alcanzar una temperatura de $393 \text{ }^\circ\text{C}$. [49]

En la Figura 38 se muestra un esquema del circuito de aceite y el sistema de almacenamiento EnergyNest, este contaba con más de 100 sensores integrados en su interior para realizar mediciones físicas y de este modo validar el rendimiento y la capacidad.

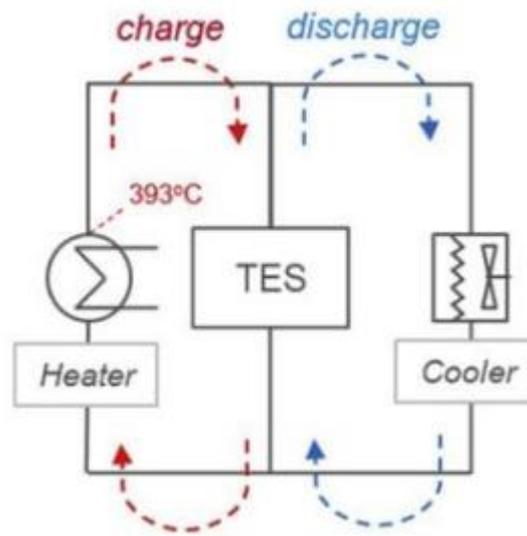


Figura 38: Diagrama simplificado del bucle. [49]

El modelo instalado está formado por cuatro módulos térmicos separados, cada uno con 24 elementos de cinco metros de largo y conectados en serie, es decir, pueden operar de forma independiente entre sí. Cada uno tiene una capacidad de 250 kWh_{th}. Los módulos están apoyados sobre un aislamiento de 450 mm de espesor construido con Foamglas. Dentro de los módulos el método de aislamiento entre los elementos térmicos conectados en serie es la perlita. Los módulos se aíslan con lana mineral de 600 mm de espesor. Además todo el conjunto está revestido con acero. Como ya comentamos cuenta con alrededor de 100 sensores, 98 sensores de temperatura dentro de los módulos, y en varios aislamientos de carga, además de 32 sensores de temperatura en las tuberías externas.

En la Figura 39 se aprecia un esquema del aislamiento a la izquierda y en la derecha una fotografía del almacenamiento de energía térmica EnergyNest.

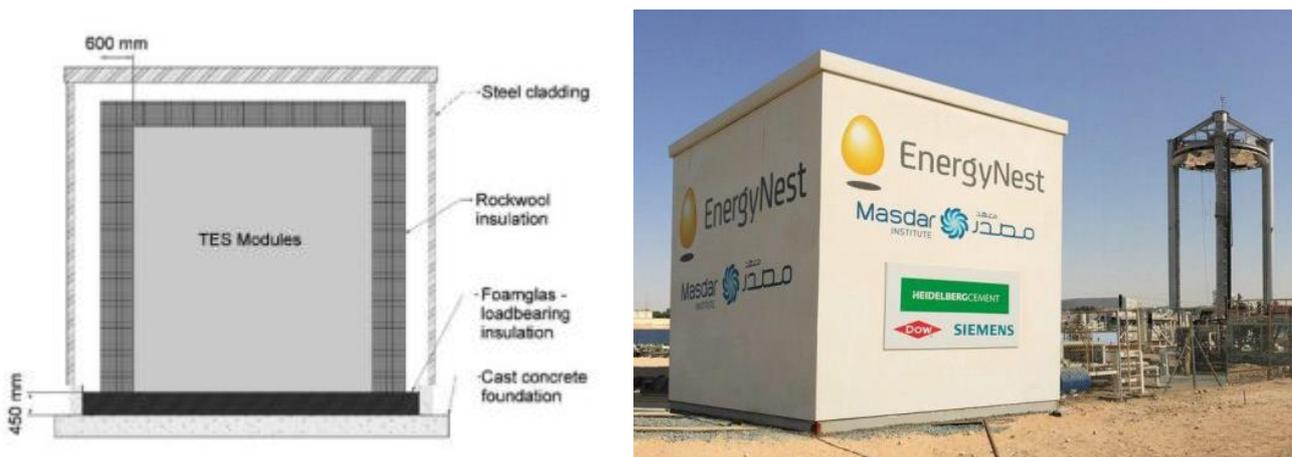


Figura 39: Esquema de aislamiento del sistema de energía eléctrica (Izquierda), fotografía del prototipo EnergyNest (Derecha). [48] [49]

El hormigón (vp1) que se ha utilizado tiene una conductividad térmica y una capacidad calorífica altas, además su resistencia a la compresión es mucho mayor, esto permite una transferencia de calor más rápida. La densidad de almacenamiento es alta, por ello se permite gradientes térmicos altos.

Como comentamos en el punto 3.5.2 las propiedades de diseño más importantes es la combinación de una alta conductividad térmica y capacidad térmica hace que el rendimiento mejore.

Las propiedades del material utilizado se comentan en detalle en el punto 3.4.4 en él se realiza un ensayo para comprobar su respuesta a los ensayos mecánicos y térmicos, por ello pasamos directamente a los resultados obtenidos durante el funcionamiento del TES.

Resultados del sistema.

Se emula un campo solar y un bloque de potencia de una planta termosolar de canal parabólico, las temperaturas de entrada para los ciclos de carga/descarga depende de esa emulación. [50]

Durante la carga, el flujo de carga es controlado de manera constante para obtener una entrega constante de energía. En fase de descarga el caudal másico se mantiene constante y de ese modo se emula el funcionamiento de una planta de CSP con un generador de vapor. Debido a esto se produce una disminución de la temperatura de salida del sistema de almacenamiento térmico y de su temperatura de retorno. [49]

Se puede apreciar en la Figura 40 la temperatura medida durante una semana por uno de los módulos, En primer lugar, en la fase de carga el fluido es calentado a 390 °C mediante un calentador eléctrico, esta se reduce hasta los 380 °C debido a las pérdidas producidas por las tuberías, la cual tiene longitudes elevadas y un diámetro pequeño.

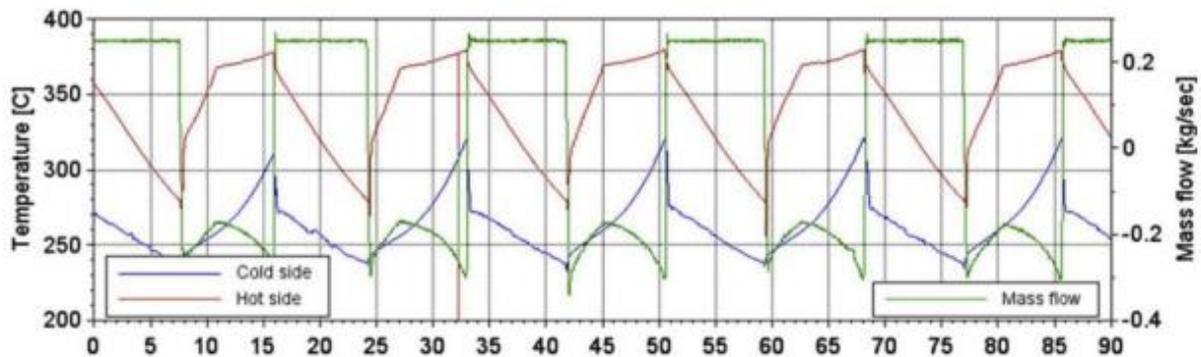


Figura 40: Medicion de la temperatura y el caudal masico durante 4 dias. [49]

La Figura 41 expone las temperaturas internas durante ese periodo, se aprecia como los datos registrados en las dos gráficas son estables y repetitivos.

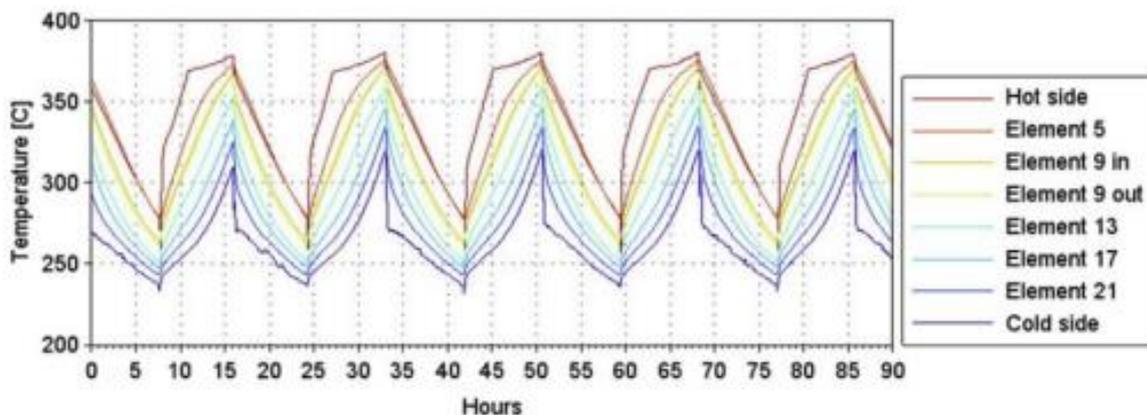


Figura 41: Temperaturas internas durante el periodo de 4 dias. [49]

La Figura 42 muestra la energía y la potencia netas medidas en el mismo periodo operacional con 8:30 horas de cargas y 8:00 horas de descarga. La energía media transferida correspondiente a un ciclo es de 360 kWh_{th}.

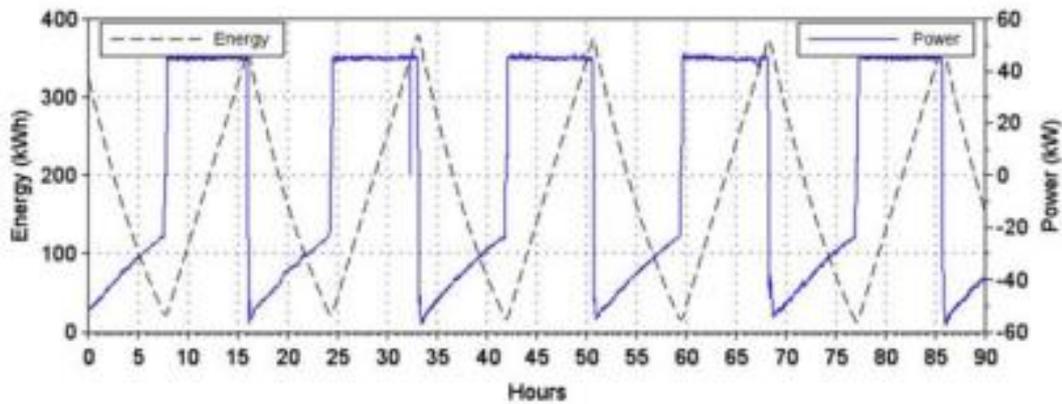


Figura 42: Potencia y energía calculadas. [49]

El rendimiento del sistema se obtiene con la comparación directa entre la simulación numérica del TES y los valores proporcionados por los sensores de temperatura y flujo.

La Figura 43 muestra un ciclo de carga/descarga en diferentes periodos desde el inicio del estudio. Las gráficas comparan los perfiles de temperatura de entrada/salida (círculos) con la simulación (línea continua). En rojo se expone el lado caliente y en azul el lado frío. En primer lugar se representa noviembre de 2015 primera fecha de ensayo, a continuación julio y octubre de 2016 y por último marzo de 2017. En 2015 se aprecia una diferencia en el lado frío entre la medición y la simulación, concretamente se debe a la diferencia entre las condiciones de temperatura iniciales reales y las simuladas del sistema. Se puede destacar la estabilidad presentada por el sistema de almacenamiento térmico.

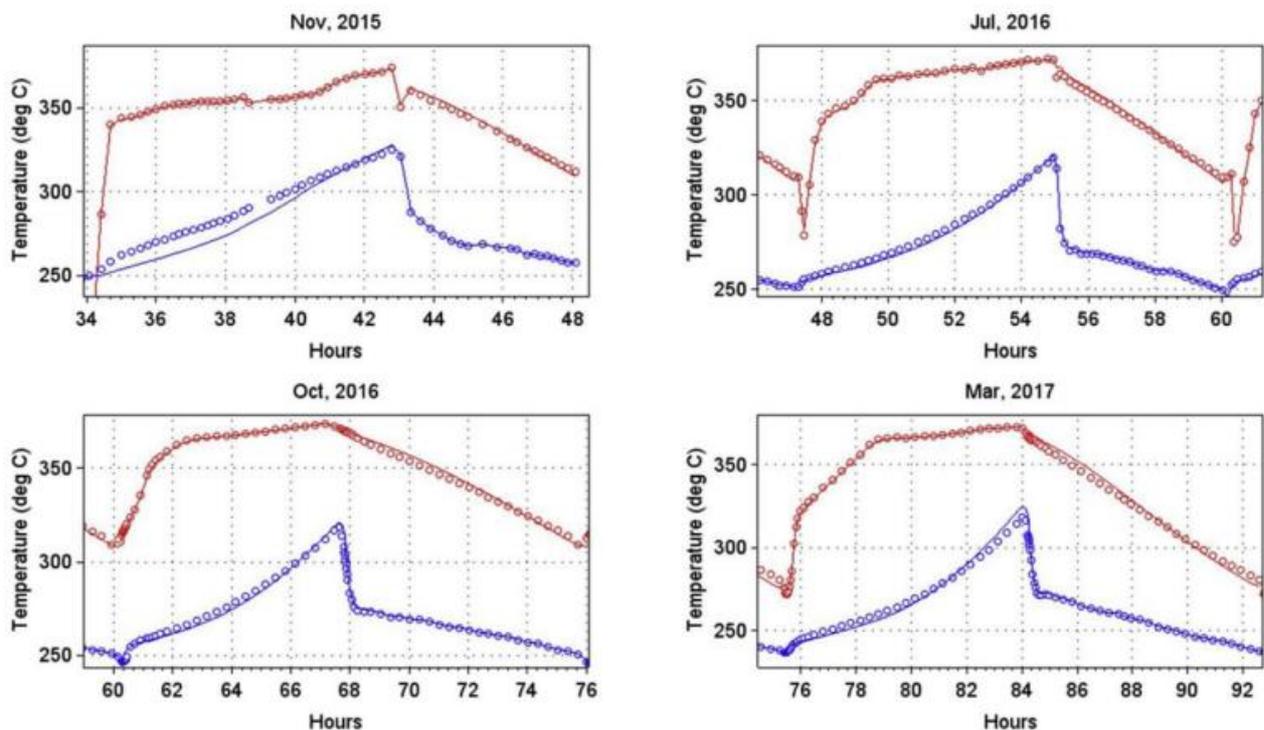


Figura 43: Comparación de perfiles de temperatura. (Líneas continuas simulaciones y círculos perfil del prototipo). [49]

Tras 6000 h de funcionamiento repitiendo el ciclo de carga y descarga, se realiza una comparación de condiciones de caudal másico y de potencia idénticas. La comparación se realiza para marzo de 2016 y mayo de 2017, en ella se aprecia como varía la temperatura media del hormigón y del caudal másico del fluido térmico

en el transcurso del tiempo (Figura 44 superior), además se estudia la evolución en el tiempo de la energía almacenada por el bloque de hormigón, liberada y la potencia suministrada (Figura 44 inferior).

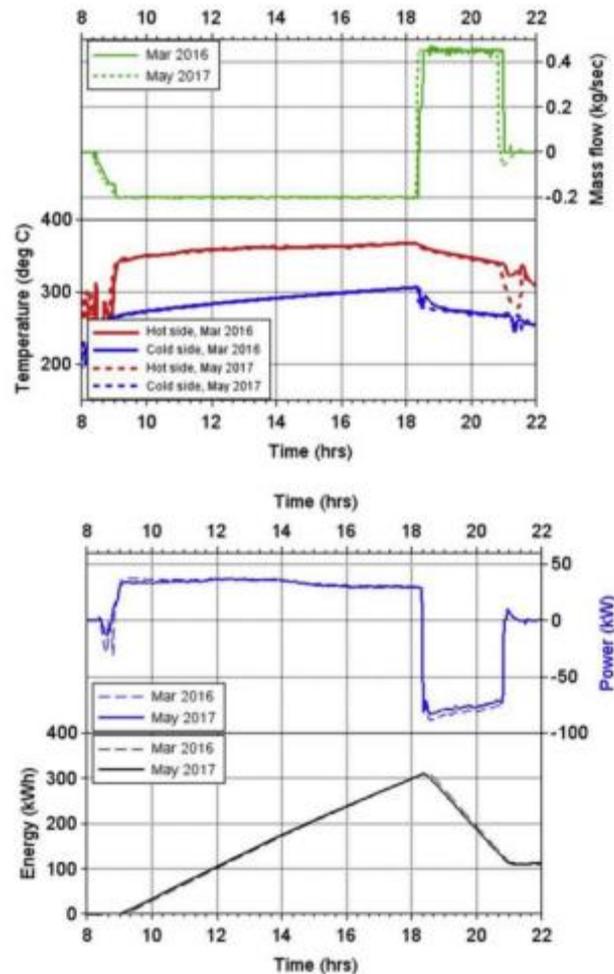


Figura 44: Comparación del rendimiento del sistema de almacenamiento térmico. [49]

Tras la finalización de este estudio, los elementos utilizados se enviaron a las oficinas de la empresa EnergyNest, donde se analizaron de forma exhaustiva. En primer lugar se hicieron diferentes cortes al hormigón y no se observaron daños visibles, además no se apreciaron agrietamientos, desconchados y separación entre las tuberías de acero y el material de almacenamiento. No hubo cambios bruscos en las propiedades térmicas y densidad tomadas antes y después. La Figura 45 muestra una distribución de agregados de cuarcita de forma uniforme y no se aprecia las propiedades mencionadas, concretamente esta figura expone unos cortes de 10 cm de grosor; a) lado caliente, b) lado medio, c) lado frío.

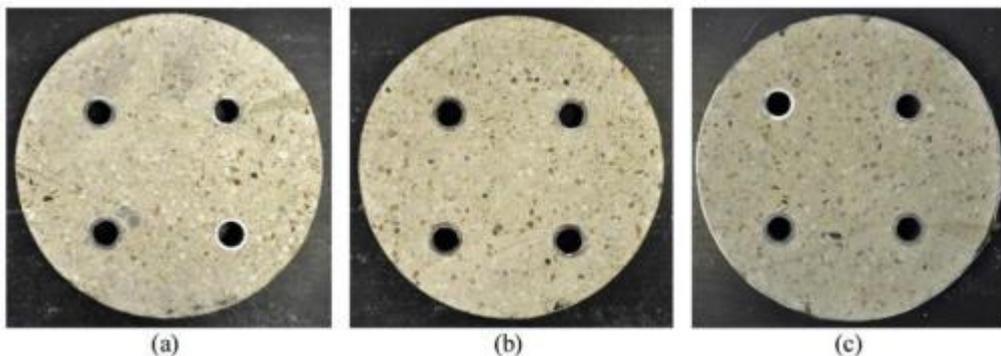


Figura 45: Muestras del estudio realizado. [49]

A modo de conclusión, esta tecnología presenta un método de almacenamiento de energía térmica de alto rendimiento con un diseño económico, escalable y fácil de dominar. Tiene ventajas destacables sobre los sistemas de almacenamiento de energía mencionados con anterioridad, presenta buenos resultados tras pruebas realidad en un largo periodo de tiempo. Tras un periodo de casi 6000 h de funcionamiento se aprecia un rendimiento estable y repetitivo. Al finalizar el periodo de operaciones se analizan los materiales empleados y no se muestra cambios de comportamiento significativos, lo que hace que el diseño de este sistema tenga un resultado positivo.

4.2 CADE, SolidTES y proyecto EDITOR.

CADE es una empresa fundada en 2003 y dedicada a servicios de ingeniería, simulación estructural y térmica avanzada a la industria de generación de energía.

Se inició en un proyecto denominado EDITOR CSP con un sistema Solid-TES, con el cual se suministra vapor de proceso de manera continua a la fábrica de refrescos KEAN.

KEAN emplea una caldera de combustibles fósiles para producir vapor saturado a 188 °C y 11 bar, este proyecto se ha integrado en la tecnología ya existente de tal modo que no se ha requerido modificación en la zona industrial.

La planta que ocupa una superficie de 1250 m², está compuesta por un campo solar de 50 m x 12 m, formada por dos filas de colectores cilindro-parabólicos con una potencia de 125 kW_{th}, dos contenedores para el almacenamiento de energía térmica en hormigón con una capacidad de 600 kWh, un contenedor para introducir la caldera de vapor (tipo kettle), la bomba de aceite térmico y el sistema de control. [51]

Esta instalación permite la producción de vapor de proceso mediante la energía solar durante la noche y días en los cuales la meteorología es negativa.

El esquema que sigue este proyecto se observa en la Figura 46, donde se observan todos los componentes mencionados.

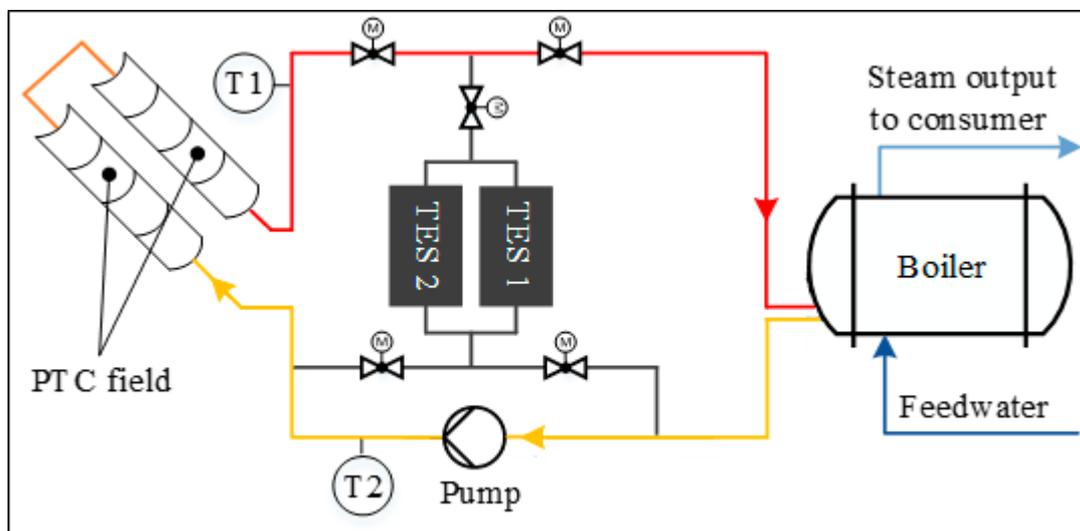


Figura 46: Esquema de la instalación. [51]

SolidTES está formado por bloques de material en estado sólido de construcción modular. El aprovechamiento térmico de la energía acumulada está entre 150 y 500 °C.

Los bloques sólidos absorben o ceden calor con un fluido caloportador que recorre el interior del mismo a través de un banco de tubos de acero.

Tiene una alta capacidad térmica lo que hace que sea un sistema compacto y rentable. Es un sistema modular y escalable, se pueden conseguir capacidades de MWh, permitiendo suministros continuos de energía solar térmica durante 24 horas. En la Figura 47 se aprecian los contenedores y la conexión que siguen unos con otros.



Figura 47: Sistema de almacenamiento SolidTES. [51]

Se utilizan materiales con excelente rendimiento térmico como es HEATEK., suministrado por la empresa Arraela. Como ya se mencionó el rango de temperaturas de almacenamiento es amplio, llegando hasta los 500 °C o incluso más. La eficiencia de almacenamiento es de 94% lo que hace que este sistema sea puntero en este sector. [51]

4.2.1 Proyecto EDITOR.

La fase de puesta en marcha se inició en 2018 y finalizó en febrero de 2019, en ella se observó como el mayor desafío de control era el modo de carga. La planta funciona de modo automática y en ella se respetan los límites de temperatura y presión. En esta automatización se ha tenido en cuenta la generación de energía, la carga y descarga, los modos de control se pueden satisfacer y adaptarse individualmente. El almacenamiento permite una producción de vapor en función de la demanda para momentos que el sol no esté disponible. [52]

Como hablamos de una industria alimentaria el control está programado en función de la carga de trabajo, el turno de la fábrica es de 8 o 16 horas de lunes a viernes. El resumen de la planificación diaria se expone en la Tabla 29. [52]

Tabla 29: Planificación entre semana. [52]

Time	4 am – 6 am	6 am – 8 am		8 am – 3 pm	3 pm – 7 pm	7 pm – 4 am
Mode	C-TES discharge	C-TES discharge + Solar field preheating	C-TES discharge + Solar steam generation	Solar steam generation	C-TES charge	Plant off

4.2.1.1 Balance de energía producido en el Sistema de almacenamiento.

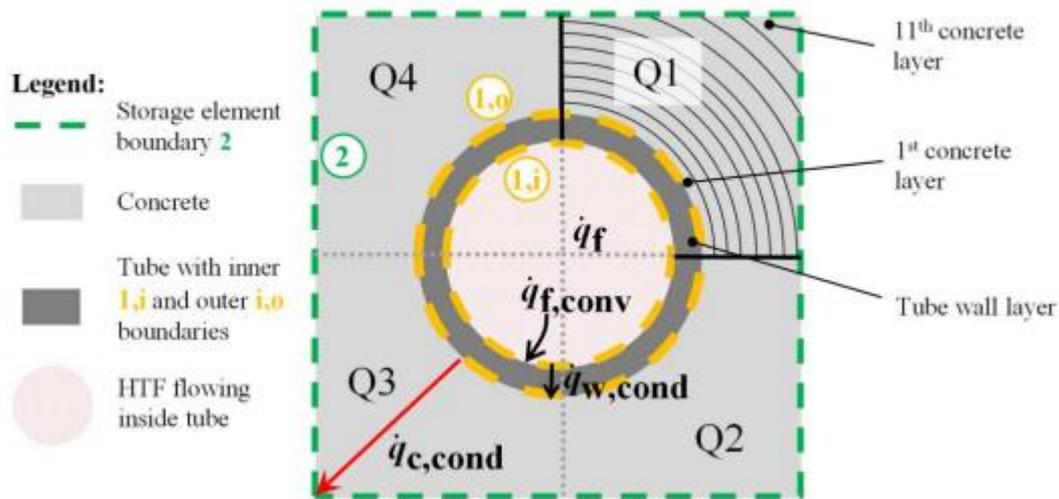


Figura 48: Balance de energía para un solo elemento acumulador. [53]

En la Figura 48 se presenta el balance de energía de un solo elemento de almacenamiento en hormigón, este se divide en cuatro cuadrantes. El cuadrante se discretiza en 11 capas, además se define que el elemento único tiene tres límites de sistema y se expresa en cuatro balances de energía. [53]

Con el primer balance se calcula el intercambio de calor entre el aceite térmico y la pared del tubo por convección forzada. En el segundo balance se calcula la conducción de calor a través de las paredes del tubo. El tercer balance se calcula el calor almacenado o extraído del hormigón. Y por último en el cuarto balance se analiza el intercambio de calor con el aislante. Además existen pérdidas de radiación y convección entre el aislamiento y el contenedor. [53]

4.2.1.2 Generación, fase de descarga y carga.

En la fase de descarga el fluido de transferencia de calor fluye directamente a la caldera para producir vapor antes del amanecer. La energía que se encuentra almacenada en el sistema TES se transfiere al agua de la caldera con un caudal másico inferior, debido a unos límites que se activan para proteger al hormigón de choques térmicos. Una vez los parámetros TES se han llevado a cabo, la descarga aumenta el flujo másico de aceite y se proporciona la potencia térmica necesaria a la caldera para que se realice una producción constante y se cumpla con los parámetros deseados.

Durante el día, si las condiciones son las adecuadas, el fluido caloportador es calentado por el campo solar, que esta posteriormente se la transfiere a la caldera.

En la fase de carga el fluido caloportador fluye desde el campo solar hacia el sistema de almacenamiento térmico, la carga se lleva a cabo con un caudal másico reducido o con uno máximo. Al igual que la descarga, se tiene limitaciones para evitar choques térmicos en la tubería de acero y en el hormigón. Transcurridos 10 minutos del inicio de la fase de carga, la diferencia de temperatura entre el fluido caloportador que se introduce en los bloques y la temperatura media de los bloques no debe ser superior a 50 °C. Después de esta fase de calentamiento, el sistema de almacenamiento se carga con la potencia proporcionada por el campo solar, el límite se incrementa a 100 °C.

4.2.1.3 Ejemplo de modo de funcionamiento.

En la Figura 49 se aprecia los datos de comportamiento de los modos de operación definidos obtenidos el 30 de julio de 2019. Se observa la presión de vapor, la temperatura del HTF a la salida del campo solar, la temperatura de descarga del HTF a la salida del sistema de almacenamiento y el DNI. El suministro de vapor es continuo desde las 5 am a 3 pm, sobre las 4 am se aprecia la producción de vapor con ayuda de la descarga del sistema de almacenamiento, durando aproximadamente hasta las 6 am. Desde las 6 am hasta las 7 am se hibrida descarga con precalentamiento del campo solar. De 7 a 8 de la mañana se combina la descarga del C-TES y de generación de vapor, funcionando a carga parcial. A las 8 de la mañana el vapor es producido en su totalidad por el campo solar, es decir, la fase de descarga se interrumpe. A las 15:00 horas comienza la fase de carga del sistema de almacenamiento. En la gráfica se aprecia una caída del DNI, según los investigadores [52] debido a la sombra en los sensores de la estación. (TF temperatura a la salida del campo solar) (Temperatura TES, temperatura del HTF a la salida del TES de la descarga)

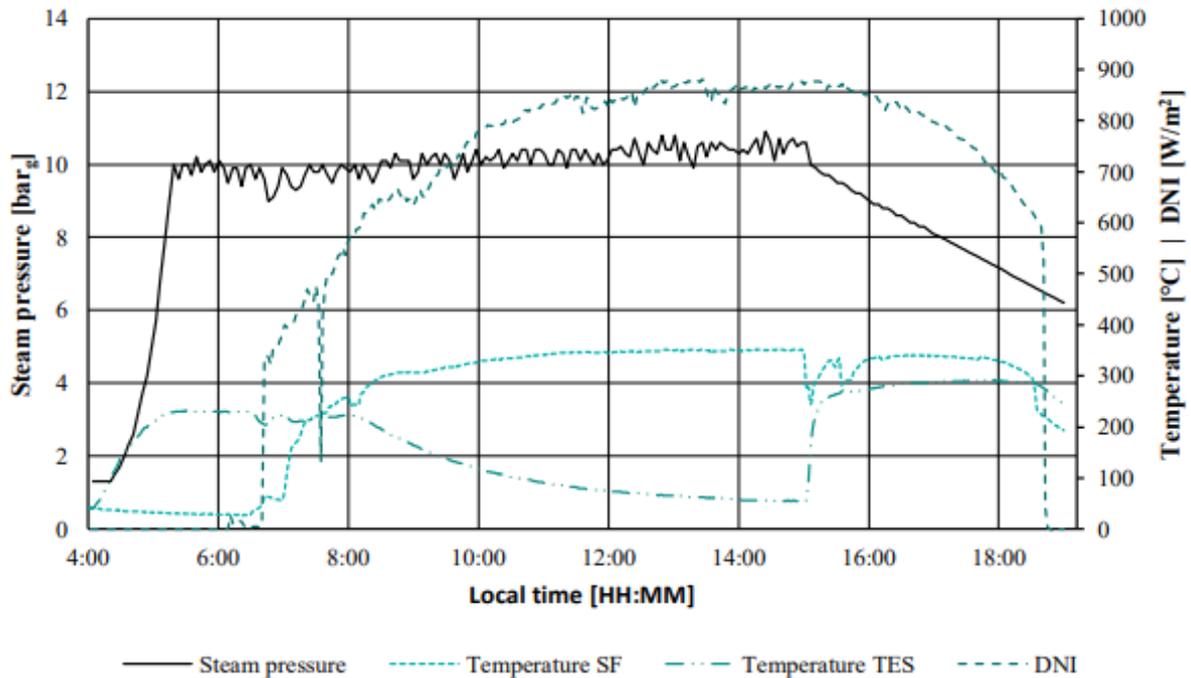


Figura 49: Modo de operación el 30 de julio de 2019. [53]

La Figura 50 expone la carga, parada y descarga del almacenamiento durante los días comprendidos entre el 22 al 26 de julio. La tasa de carga es aproximadamente de 15 kelvin/hora, cargándose parcialmente durante el día y descargándose por la mañana temprano.

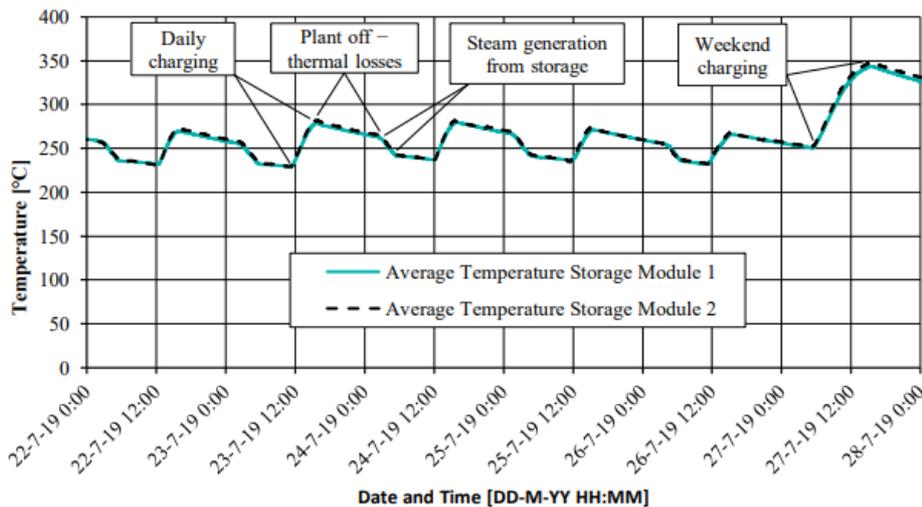


Figura 50: Almacenamiento de carga, parada y descarga durante 1 semana. [53]

Por las noches se observan pérdidas de 20 K, esto se debe a que el volumen de los bloques de hormigón es inferior en comparación con la gran superficie.

La capacidad calorífica específica del hormigón se mide durante el transcurso de varios meses, la Figura 51 expone este valor medido para diferentes temperaturas, los resultados se asemejan a los simulados.

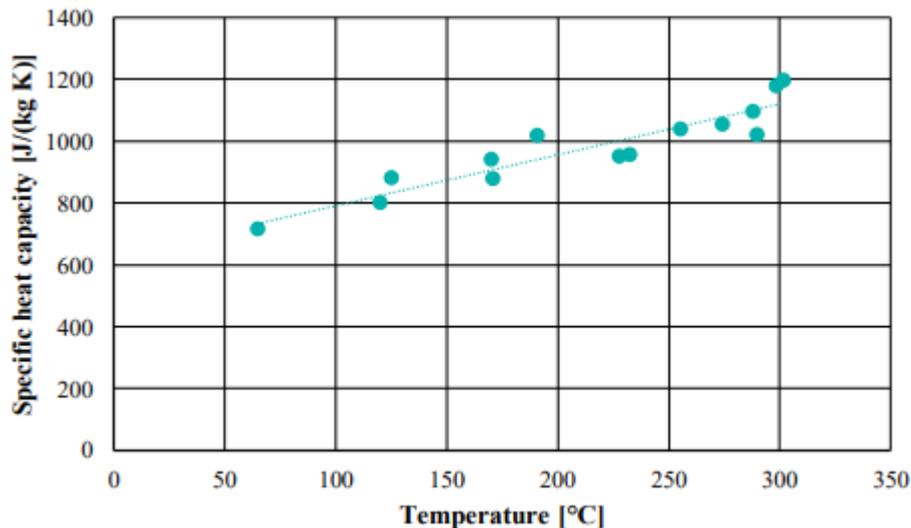


Figura 51: Capacidad calorífica específica. [53]

4.3 Proyecto WESPE.

Las unidades de almacenamiento de calor sensible de este Proyecto fueron desarrolladas por el Centro Aeroespacial Alemán y financiado por el Gobierno Alemán. Este Proyecto se denominó WESPE y fue instalado en la plataforma solar de Almería, España. [54]

Los materiales de almacenamiento utilizados son diferentes y conectados en paralelo, en primer lugar un moldeable de cerámica y en segundo lugar hormigón de alta temperatura.

La cerámica moldeable se basa en un aglutinante que contiene Al_2O_3 y agregados de óxidos de hierro. El hormigón de alta temperatura, está compuesto por cemento de alto horno, óxidos de hierro, cenizas de combustión y pequeños materiales auxiliares. En la Figura 52 se aprecian las propiedades de los materiales mencionados.

Material	Castable ceramic	High temperature concrete
Density [kg/m^3]	3500	2750
Specific heat capacity at 350 °C [J/kg K]	866	916
Thermal conductivity at 350 °C [W/m K]	1.35	1.0
Coeff. of thermal expansion at 350 °C [$10^{-6}/\text{K}$]	11.8	9.3
Material strength	Low	Medium
Crack initiation	Hardly no cracks	Several cracks

Figura 52: Propiedades de los materiales utilizados. [46]

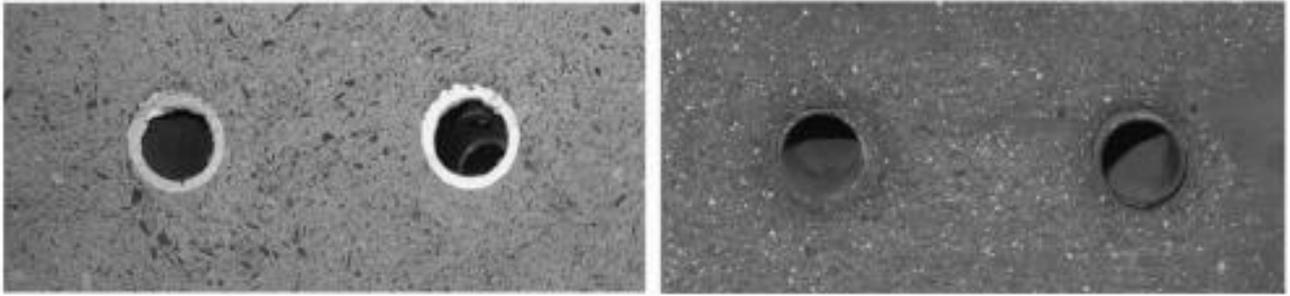


Figura 53: Corte TES hormigón (izquierda) y cerámica moldeable (derecha). [46]

Los intercambiadores de calor están compuestos por 36 tubos de acero de alta temperatura, los colectores y distribuidores siguen una distribución de forma que el flujo se uniforme en todos los tubos.

Se observa como el intercambiador de calor no sigue la geometría comentada en el punto 3.1, la cual es la más óptima, este proyecto se desarrolló en 2001, es por ello que en este periodo de tiempo se ha avanzado lo suficiente como para mejorar el rendimiento de esta tecnología.

4.3.1 Distribución y funcionamiento.

Como ya se ha comentado estos dos sistemas de almacenamiento se probaron en Almería, y se rige al esquema de la Figura 54. Este campo solar garantiza un máximo de 480 kW y los sistemas de almacenamiento se diseñan para una potencia de 350 kW, proporcionando 34 kW de pérdidas térmicas entre las tuberías y el sistema de almacenamiento.

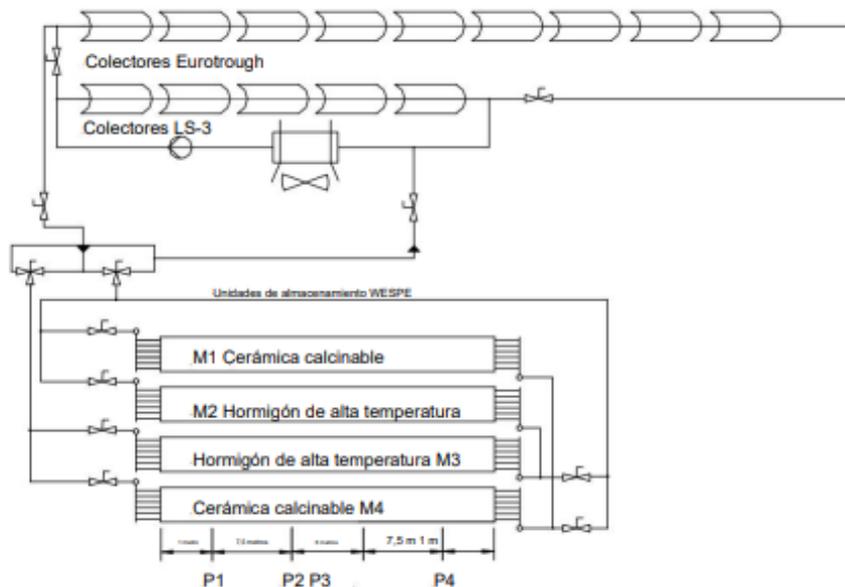


Figura 54: Esquema del proyecto. [46]

Los bloques del mismo material funcionan mediante una conexión en serie, ocurre lo contrario con los de diferente material, estos están contactados en paralelo.

La Figura 55 muestra los caudales de aceite térmico para las fases de carga y descarga, la temperatura en el núcleo del módulo de almacenamiento en cuatro posiciones diferentes. La zona P1 durante la carga es la más elevada porque se encuentra más próxima al aceite, como consecuencia de esto P4 es la más baja.

En la Figura 56 se analiza la potencia transferida en los ciclos 1 y 2. La potencia transferida al aceite se calculó a partir del caudal másico del aceite, las temperaturas de entrada y salida del fluido caloportador y el calor específico del aceite.

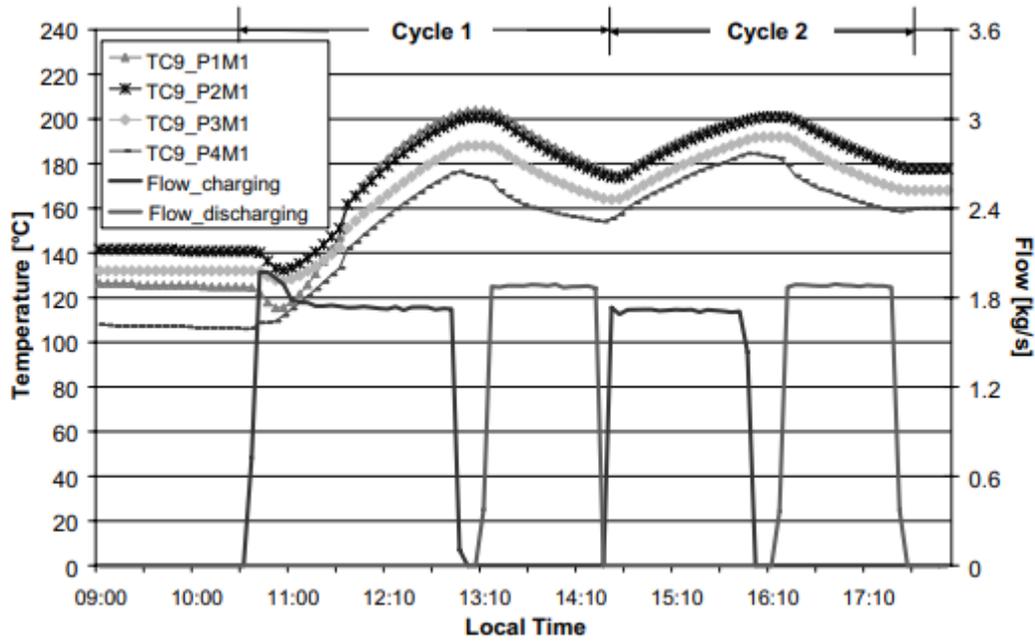


Figura 55: Ciclado del módulo cerámico. [46]

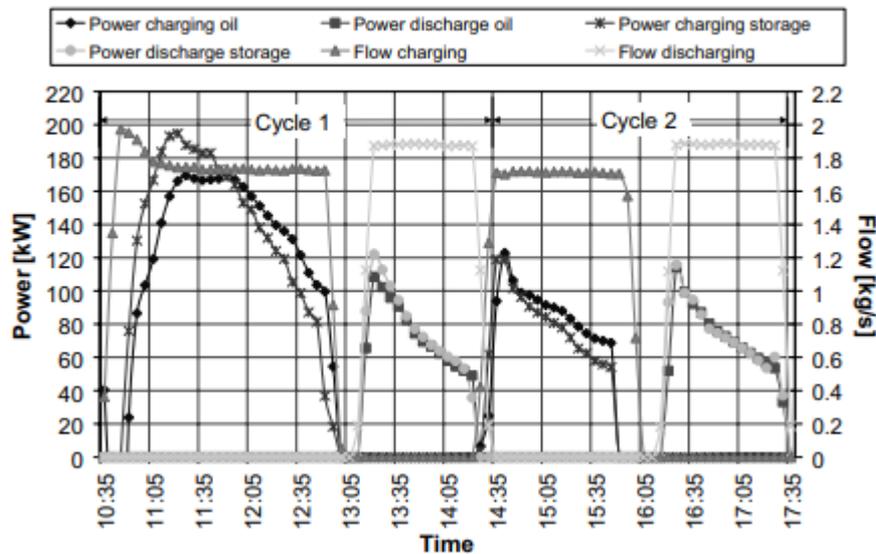


Figura 56: Curvas de carga y descarga, almacenamiento y caudal másico. [46]

Desde el aceite se transmite al sistema de almacenamiento un total de 391 kWh y una salida total del aceite de 175 kW durante la descarga de los dos ciclos. La pérdida de calor durante 7 horas es de 24 kWh.

La Figura 57 expone el calentamiento de los dos sistemas de almacenamiento conectados en paralelo, M1 la cerámica y M2 el módulo de hormigón.

Se aprecia como el caudal del módulo de cerámica es un 10 % superior al del hormigón. Al igual ocurre para la diferencia entra la temperatura de entrada y salida, para el módulo cerámico es un 15% mayor.

Los gradientes de temperatura de almacenamiento son los mismos, aunque un 25% más de potencia se ha transferido al módulo cerámico.

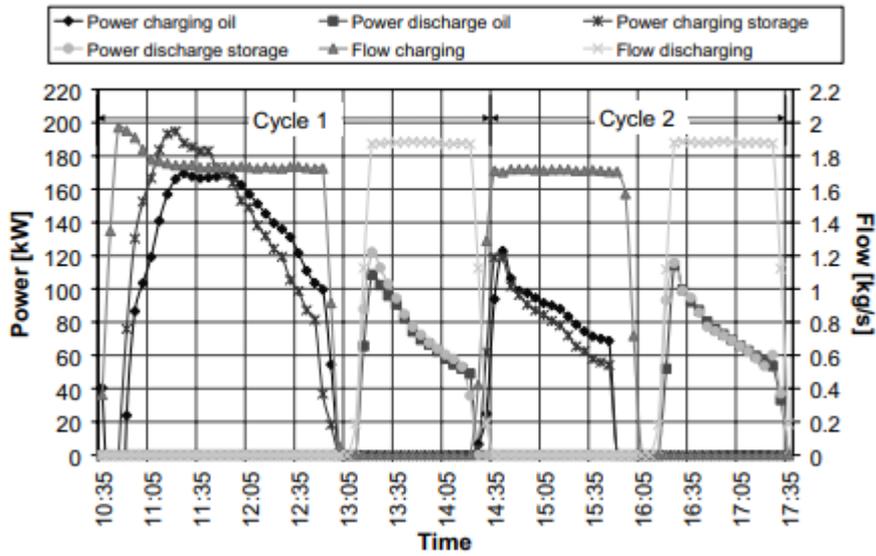


Figura 57: Calentamiento en paralelo de M1 y M2. [46]

Los dos materiales han mostrado resultados positivos, el hormigón a alta temperatura de nuevo presenta efectos positivos para su utilización como medio de almacenamiento.

4.4 Proyecto Polyphem.

El objetivo principal de este proyecto es mejorar el rendimiento de las pequeñas plantas de torre. Se implementa un ciclo combinado formado por una turbina de gas solarizada, una máquina de ciclo híbrido y un sistema de almacenamiento térmico situado entre los dos ciclos.

Se construye una planta de 60 kWe con un almacenamiento de 2 MWh de capacidad neta, esta instalación se realiza en Themis (Francia). La planta sigue la siguiente configuración.

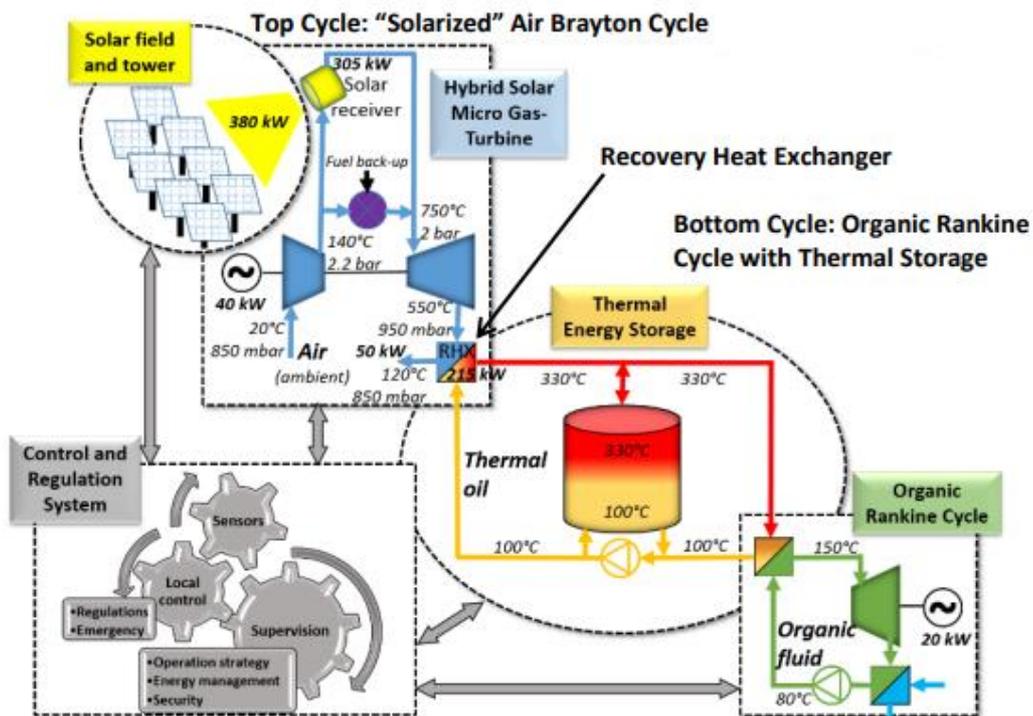


Figura 58: Esquema de la planta. [61]

El concepto es un ciclo combinado híbrido impulsado por energía solar. Los componentes principales y más destacados son:

- Receptor solar con aire a presión.
- Micro-turbina de gas híbrida impulsada por energía solar.
- Intercambiador de calor recuperador.
- Almacenamiento de energía térmica con ladrillos huecos de hormigón.
- Sistema ORC (Ciclo Rankin orgánico) que acepta aceite térmico como fuente de calor.

Se aprecia en la Figura 58, la unión de dos ciclos termodinámicos con un sistema de almacenamiento intermedio para realiza un ciclo combinado.

Este destaca por la hibridación entre un ciclo Rankin organico con un ciclo Brayton abierto, la integración de un receptor solar de alta temperatura y el TES de bajo costo, que se analizara en el siguiente punto.

Sistema de almacenamiento.

El sistema de almacenamiento de energía térmica es un depósito de termoclina sólido y utiliza aceite térmico como fluido caloportador. El aceite que se utiliza en este prototipo es Jarytherm DBT, tiene una presión de vapor muy baja, lo que hace que se trabaje a presión atmosférica en el depósito.

Este sistema de almacenamiento destaca por el uso de ladrillos de hormigón. La geometría de estos ladrillos debe de ser fácil de realizar, debido a que deben de reproducirse a gran escala y que el coste depende de este factor.

En primer lugar, se analizó el uso de ladrillos macizos con diferentes tamaños, como se puede observar en la Figura 59.

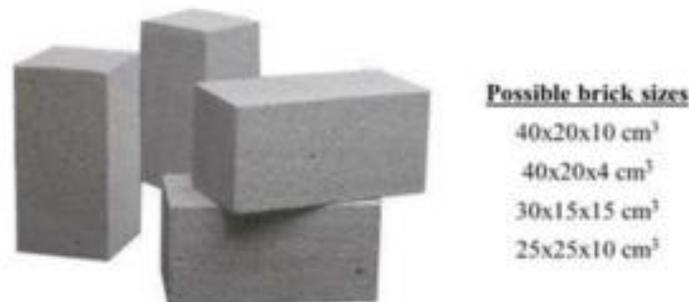


Figura 59: Ladrillos macizos. [44]

El material usado como relleno es el HEATEK-RV, con alto contenido de escorias negras metálicas granuladas. Las características de este material se pueden observar en el apartado HEATEK., concretamente en la Tabla 16.

Para la elección de este material se han analizado tres factores:

- Material simple, tanto en su fabricación como en la instalación en el tanque a gran escala.
- La transferencia de calor entre el fluido y los ladrillos debe ser buena.
- No se debe presenciar vías con menor caída de presión, por donde el fluido circule con mayor facilidad, esto se hace para evitar áreas donde se favorezca el intercambio de calor y otras áreas donde ocurra todo lo contrario.

Se estudian varias geometrías, para la disposición de los ladrillos. Una geometría donde se imponen canales verticales y una geometría en la que se imponen cambios a la dirección del aceite, mejorando de este modo la

transferencia de calor. En la Figura 60 se observan estos patrones.

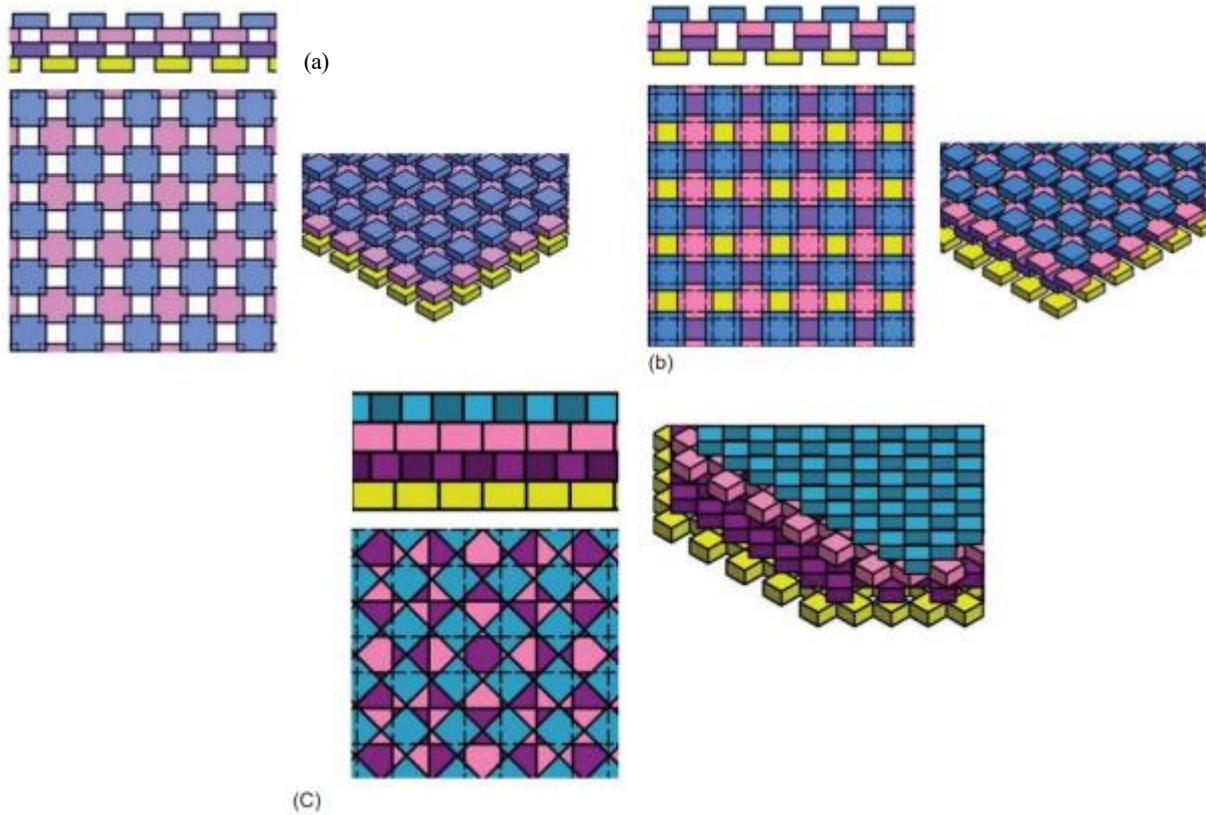


Figura 60: Patrones geometricos. Izquierda vista lateral y superior de las capas, derecha vista isométrica. [44]

Para mejorar la transferencia de calor, los ladrillos macizos se modifican y se fabrican siguiendo la geometría de la Figura 61.

Se realiza un estudio comparativo entre el ladrillo macizo y el de huecos. En primer lugar, se realiza un cálculo del número de Biot, con este valor relacionaremos la resistencia de transferencia de calor en el interior del cuerpo con la superficie. En segundo lugar, se analiza el número de Nusselt y Reynolds. Y por último se estudia el número de Prandtl.

Los resultados obtenidos se exponen en la Tabla 30.



Figura 61: Medidas ladrillo comercial; Ladrillo hueco de hormigón Heatek-RV; Medidas ladrillo hueco Heatek-RV. [44]

Tabla 30: Resumen de resultados para las tres propuestas de ladrillos. [44]

	Reynolds number	Prandtl number	Nusselt number	Biot number
Solid bricks configuration (25*25*10 cm ³)	88.3		42.7	0.9 <Bi<2.2
Commercial hollow bricks configuration	15.1	13.9	3.66	0.06
Polyphem hollow bricks configuration	13.2		3.66	0.06

El significado de que el valor del número de Biot sea superior a 1, es la falta de uniformidad de los campos de temperatura, eso quiere decir que en los ladrillos macizos no hay una transferencia de calor eficiente. Otro punto a destacar es la capacidad de almacenamiento, al tener una mayor porosidad, la capacidad de almacenamiento es menor.

En la Tabla 31, se puede observar un resumen de los aspectos importantes para la elección del material adecuado. Se ve como en los ladrillos regulares se almacena menos energía que en los demás casos..

Tabla 31: Comportamiento térmico de las diferentes configuraciones. [44]

	Regular bricks	Commercial hollow bricks	Polyphem hollow bricks
Porosity	0.50	0.35	0.40
Fluid residence time/brick	308 sec	216 sec	243 sec
Max. thermal energy stored (Polyphem tank)	3.8 MWh	4.3 MWh	4.1MWh

Como conclusión final, se aprecia como al aumentar la porosidad del material, la capacidad de almacenamiento térmico es menor. Se observa como el número de Biot es muy elevado, por lo tanto la transferencia de calor no es efectiva. En cuanto a los ladrillos huecos, el número de Biot es inferior a 0,1, como consecuencia presenta una mayor capacidad de almacenamiento térmico.

Es decir, la mejor geometría, por su eficiencia y facilidad a la hora de trabajar con ella, es la configuración de ladrillos huecos Heatek-RV.

No obstante este estudio se está llevando a cabo en la actualidad, es por ello que los resultados obtenidos no se pueden comparar con los demás proyectos.

4.5 Conclusión.

Hemos presentado varios proyectos que se están llevando a cabo o ya están instaurados. Vemos como hay empresas dedicadas al I+D que están beneficiando a esta tecnología, con su implicación en el desarrollo. Las empresas más volcadas son Siemens Gamesa, EnergyNest, SolidTES, Engie SA, Holcim, CADE y Arraela.

El diseño más interesante desde mi punto de vista es el sistema de EnergyNest, debido a su geometría y el material utilizado, presenta una relación superficie/volumen más favorable que otras tecnologías. Además, el material utilizado como sólido, es el hormigón Heatcrete, que hemos observado en el punto anterior las propiedades positivas que presenta, siendo uno de los candidatos a mejor material, debido a su alta conductividad térmica y su alta capacidad calorífica específica. Al seguir una geometría tan moldeable, este se puede ampliar con facilidad, colocando los elementos térmicos en serie y paralelo. El transporte es simple, debido a que se encuentra en un contenedor fácil de manejar. Las capacidades oscilan entre los MWh y GWh. El proyecto Masdar implemento esta tecnología, instauro un almacenamiento de 1 MWh, gracias a la conexión de dos baterías de 500 kWh. Presenta buenos tiempos de carga y descarga, cargas en 8:30 h y descargas en 8:00 h. Además, se demuestra la alta transferencia de calor que presenta este material, se expuso que tenía una

conductividad térmica de $2.22 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, por ello en este proyecto la transferencia de energía media por ciclo es de 360 kWh. En general resulto ser positivo, es un sistema de almacenamiento de energía térmica de alto rendimiento, tras más de 6000 h de funcionamiento se aprecia que el rendimiento es estable y repetitivo. Es por ello que esta tecnología es buen candidato para aplicaciones industriales.

Por otro lado, se expuso el proyecto EDITOR, desarrollado por CADE. Utiliza otro de los materiales candidatos a ser el más positivo para esta tecnología, en concreto utilizan HEATEK, material que presentaba buenos resultados tanto de conductividad como de capacidad calorífica específica. Este proyecto es muy interesante debido a que se aplica a una industria que necesita suministro siguiendo una planificación semanal, se puede ver como los resultados son favorables. En este caso el sistema de almacenamiento se carga durante el día y realiza una descarga parcial por la mañana temprano, es decir, observando la Figura 49, se aprecia como la temperatura de salida del sistema de almacenamiento desde las 4 am hasta las 7 am va aumentando, eso quiere decir que se está realizando una descarga y la industria está trabajando gracias al TES. Concluyendo, de este proyecto se pueden observar que hay pérdidas elevadas, a pesar de los buenos rendimientos. Estas pérdidas se pueden reducir mejorando los componentes como las conexiones metálicas y de ese modo aumentar la eficiencia del sistema.

El proyecto WESPE, es interesante analizarlo debido a que su puesta en marcha fue en el 2001 y los estudios comenzaron en 1988, en este se comparan dos materiales, la cerámica moldeable y hormigón a alta temperatura. Se concluye en este proyecto que la cerámica moldeable presenta mejores resultados que el hormigón de alta temperatura. En concreto un 20 % más de capacidad de almacenamiento. El hormigón de alta temperatura tiene mayor calor específico que la cerámica moldeable, lo que hace que se esperen resultados diferentes a los obtenidos. No obstante, como se comentó en el apartado Conclusión., debe existir una buena relación entre conductividad térmica y capacidad específica, cosa que ocurre en la cerámica moldeable. La conductividad térmica en la cerámica moldeable es un 35% superior al hormigón de alta temperatura. En este ensayo se diseñan sistemas de almacenamientos para potencias de 350 kW, pero se presentan altas pérdidas térmicas entre las tuberías y el sistema de almacenamiento. El aceite transmite al sistema de almacenamiento 391 kWh, y se estiman unas pérdidas de calor de 24 kWh durante 7 horas. Finalmente se concluyó, que el uso de hormigón a alta temperatura a pesar de tener parámetros más negativos, ambos trabajan prácticamente al mismo gradiente de temperatura. Lo que hace que se decida que es más favorable el uso de hormigón a alta temperatura debido a su resistencia, fácil manejo y coste.

Para finalizar se expone un proyecto denominado POLYPHEM, que se está llevando a cabo por CIEMAT (Arraela), con fecha de inicio 01/04/2018 y fecha de finalización prevista agosto de 2022. Este proyecto está financiado por la UE y pueden seguirse los resultados a través de la página web "Polyphem Project". El proyecto es muy interesante, se basa en una planta de torre con un almacenamiento de 2 MWh. Utiliza el material mencionado y estudiado HEATEK., pero con una configuración especial, ya que se utiliza una geometría de ladrillos de hormigón huecos, debido a que su número de Biot es inferior, lo que hace que su capacidad de almacenamiento térmico sea mayor.

5 CONCLUSIÓN.

En este trabajo se pueden obtener diferentes conclusiones según el punto de vista personal. Hay personas que piensan que la única transición energética será posible gracias a la energía nuclear u otra energía no renovable como respaldo. En este proyecto se ha expuesto alternativas que pueden sustituir el respaldo energético que muchos piden.

Se puede percibir que la gran dificultad de los sistemas de almacenamiento de energía es su capacidad, sobre todo cuando la fuente de energía es aislada e intermitente. No obstante si se realiza a gran escala se puede hacer una inserción en la red eléctrica favoreciendo así al uso de energías renovables en su totalidad.

En el punto 1, hemos estudiado diferentes tecnologías de sistemas de almacenamiento. Se aprecia como existen diferentes alternativas para almacenar energía, las baterías electroquímicas de ion litio son las más utilizadas en la actualidad y se están realizando diversos estudios sobre ellas, el problema principal que presenta es su coste. Para utilidades de almacenamiento a pequeña escala está presentando resultados positivos a precios asequibles, pero si hablamos de almacenamientos de energía del orden de MWh, su coste es súper elevado. Es decir, los dos principales problemas que percibo de esta tecnología son los precios en comparación con sus equivalentes y la inestabilidad que presentan. Además, presentan una vida útil de unos tres años y tienen un número limitado de cargas.

Un sistema de almacenamiento que en la actualidad es puntera, son las centrales hidroeléctricas de bombeo, como se mencionó en el punto 1, esta tecnología es la de mayor capacidad en el mundo y almacena energía en grandes periodos de tiempo, tiene una capacidad en torno a 9000 GWh a nivel global. [55] Sin duda dentro de los sistemas de almacenamiento de energía, las centrales hidroeléctricas de bombeo presentan los mejores resultados, es el más extendido, más rentable y sus tiempos de respuestas resultan de lo más ágiles.

El almacenamiento de energía térmica es un gran candidato para la descarbonización, somos una sociedad cada vez más dependiente de la energía eléctrica, y hay que gestionar de manera óptima los recursos energéticos de los que disponemos, además de buscar e investigar sobre diferentes alternativas. Aquí es donde destaca esta tecnología la cual está mostrando buenos resultados para diferentes rangos. Como se expone en el trabajo en el punto 2, se puede clasificar en áreas de alta, media y baja temperatura. En este trabajo se explica la combinación de centrales termosolares con sistemas de almacenamiento térmico, pero esta se puede combinar con cualquier energía renovable. Además como se aprecia en el punto 4, se están presentando aplicaciones industriales, donde presenta muy buenos resultados.

Dentro de los almacenamientos de energía térmica existen como se mencionó en el punto 2, diferentes procesos, de calor sensible, latente y químicos. Se aprecia como la complejidad de los procesos de calor sensible es más baja que la de calor latente, esto se debe a la dificultad que presenta el montaje de un sistema de almacenamiento de calor sensible. La densidad de almacenamiento debido al alto calor de fusión latente es mayor en los sistemas de almacenamiento de calor latente, esto es una ventaja que presentan frente a la otra tecnología. No obstante el precio de implementación es inferior en el proceso de calor sensible, este es el caso del hormigón, estudiado en este trabajo, el cual presenta los costes más económicos. La implementación de los procesos de calor sensible es sencilla. Son dos tecnologías a las cuales les queda un largo proceso de investigación y desarrollo, pero que presentan muy buenos resultados, ya que trabaja en rangos de temperaturas que pueden llegar a los 700 °C. Los materiales más utilizados en la actualidad en los sistemas de almacenamiento térmico son los materiales inorgánicos como las sales.

Para finalizar se hará una conclusión final sobre el punto 3 y 4, donde se habla de los materiales utilizados para mejorar las propiedades del hormigón y las diferentes aplicaciones que se están llevando a cabo.

Se comprueba como el mejor modelo de intercambiador de calor consiste en una estructura de hormigón por la cual circula el fluido calo portador por tubos que siguen una distribución triangular, con esto se consigue una mejor distribución de temperatura. Además los módulos de almacenamiento deben de seguir geometrías hexagonales regulares. Se ha concluido que la estructura óptima de un intercambiador de calor es de espiral, pero su elevado coste hace que se utilicen intercambiadores de calor lisos. El material más usado en estos tubos es el acero, debido a que tienen muy buena transferencia de calor con el hormigón. Aunque como hemos

estudiado en los apartados anteriores, usar acero presenta un problema, los coeficientes de expansión térmica son diferentes y esto hace que se puedan producir defectos en el hormigón, es por ello que siempre se debe de colocar materiales entre el intercambiador y el hormigón.

Una vez analizado el intercambiador de calor utilizado en los sistemas de almacenamiento térmico en hormigón, se examina como varían las propiedades del hormigón según los aditivos utilizados. En el punto 3.4 se expusieron cuatro tipos de compuestos que forman el hormigón.

En primer lugar vimos como el hormigón reforzado con fibra de nylon presenta resultados positivos en cuanto a la resistencia mecánica, al contener la fibra de nylon hace que se inhiban los agrietamientos y que su resistencia media a la tracción se mejore. Este sufrió menos retracción por secado que un hormigón normal, esto es una ventaja debido a que se limitan las micro fisuras en la pasta de cemento y la vida útil del material es superior. En cuanto a las curvas térmicas y de flujo de calor se percibió como añadir fibras de nylon hizo que mejorara la capacidad calorífica, además el uso de fibras hace que la conductividad mejore, ya que hay una mayor conexión entre porosidades debido a las fibras quemadas. En el párrafo anterior comentamos la importancia del coeficiente de expansión térmica, en esta mezcla se observa como gracias al nylon el coeficiente de expansión térmica es similar al del acero inoxidable. Se concluye como el comportamiento del hormigón reforzado con fibras de nylon presenta una buena estabilidad hasta los 450 °C y como la porosidad tras la fusión de las fibras ayuda a prevenir la propagación de grietas térmicas. Además el uso de materiales reciclados como es la fibra de nylon que se puede obtener de alfombras, hace que se ahorre en materias primas, energía y se reduzcan sus costes.

En segundo lugar, se analizó el cemento a base de aluminato de calcio para su uso en hormigón, este presenta unos resultados muy positivos. El hormigón a base de CAC puede ser empleado para temperaturas de hasta 550 °C. La deshidratación que presenta es a alta temperatura y presenta deterioros en la resistencia mecánica y micro estructural. Además si se usan granulometrías de forma correcta la resistencia a ciclos térmicos de alta temperatura mejora.

En tercer lugar, se estudio el uso de diferentes adiciones recicladas y se hizo una comparación. Se analizaron dos muestras con diferentes componentes, la etiqueta A compuesta por áridos reciclados y fibras de nylon y la etiqueta B se le añaden aditivos metálicos, fibras, polvos y virutas. En la Tabla 11, se pueden analizar estos aditivos con mayor detalle. Tras un análisis se llegó a la conclusión de que el hormigón FSCL compuesto por virutas metálicas recicladas y fibras de nylon, soportan temperaturas de hasta 450 °C, presenta una conductividad térmica mayor a 2 W/m·k, el rango de conductividad térmica para materiales de almacenamiento térmico esta entre un rango de 1 y 2 W/m·k, es por ello que la conductividad térmica resultante es muy buena. No presentan agrietamientos significativos durante los ciclos térmicos. En resumen, las muestras FSCL resulta ser un buen candidato para la fabricación industrial de elementos de almacenamiento térmico.

Por último, se estudió el hormigón Heatcrete, hormigón desarrollado por la empresa NEST y utilizado para temperaturas de 400 °C. Este material presenta una conductividad de 2.2 W/m·k lo que ayuda a la velocidad de las fases de carga y descarga. Los resultados de las propiedades físicas a 400 °C son muy buenas, no se observa grietas. Se pueden apreciar pérdidas de masa pero se demuestra que son debidas a las fugas de vapor de agua.

Un punto a destacar que se obtiene al analizar diferentes literaturas, es que no solo nos podemos basar en el valor de la conductividad térmica para la elección de un buen material, se necesita un análisis térmico para apreciar el comportamiento dinámico y se precisa de un equilibrio entre el comportamiento capacitivo y el de transferencia de calor.

No obstante, tras una comparación de todos los materiales estudiados en la literatura, se concluye que el hormigón geopolímero presenta los mejores resultados, debido a que la eficiencia de almacenamiento y la densidad de potencia son superiores a los compuestos cementosos o a un hormigón convencional.

Tras el análisis de los mejores aditivos que se han encontrado en la literatura, se estudia las aplicaciones en la industria actual y se observan las diferentes empresas que se están enfocando en la investigación y mejora de estos sistemas de almacenamiento térmicos.

Las grandes empresas que están apostando por esta tecnología son Siemens Gamesa Renewable Energy, EnergyNest, SolidTes, Engie SA, Holcim, CADE entre muchas otras.

EnergyNEST por ejemplo tiene un diseño muy peculiar y fácil de dominar. Se observa en el punto 4.1 como la capacidad de estos sistemas pueden llegar al orden de MWh e incluso al de GWh. El hormigón que utilizan es el HEATCRETE y los intercambiadores de calor se conectan hidráulicamente para formar baterías térmicas.

Como se mencionó con anterioridad, presentan una geométrica moldeable y fácil de transportar, estas baterías se introducen en container adaptados, como se estudió en la Figura 37.

EnergyNEST llevo a cabo un proyecto denominado Masdar del cual se obtuvo muy buenos resultados, con una capacidad total de 1 MWh, además el montaje del sistema de almacenamiento duro tan solo 6 meses. En este proyecto se demostró que un material de energía térmica en estado sólido, combinado con un diseño modular, presenta una forma muy atractiva de almacenar energía térmica. Resulto tener un rendimiento estable y repetitivo durante 279 ciclos, lo que demuestra que no se producen cambios ni degradaciones.

Como consecuencia de los buenos resultados que está presentando esta tecnología, hay industrias como la fábrica de refrescos KEAN que ha implementado este sistema en sus instalaciones, este sistema de almacenamiento térmico tiene una capacidad de 600 kWh, y se utiliza para introducir vapor durante la noche y días que la meteorología es negativa. Este proyecto lo llevo a cabo CADE y tiene un aprovechamiento térmico de energía acumulada entre 150 y 500 °C. Lo más destacable es el sistema de control con la que cuenta esta industria, la cual va en función de la carga de trabajo.

Aunque se esté apostando más en la actualidad por este tipo de sistemas, se llevan realizando estudios desde años atrás. Un ejemplo es el Proyecto WESPE, que fueron desarrollados por el Centro Aeroespacial Alemán y se instaló en la plataforma solar de Almería. Este proyecto comenzó en el 2001, y se compone de dos sistemas de almacenamiento de diferentes materiales, destacable, debido a que podemos combinar diferentes sistemas de almacenamiento, con conexiones paralelo/serie entre ellos, según favorezca una conexión u otra. Este proyecto cuenta con una capacidad de potencia de 350 kW y se mostraron resultados muy positivos.

En resumen, el almacenamiento de energía a gran escala es la opción más viable para manejar las fluctuaciones de carga. En este proyecto se ha expuesto como los sistemas de almacenamiento térmico en hormigón son una tecnología barata, con disponibilidad de materiales y que permitirá el almacenamiento de energía a costos inferiores.

REFERENCIAS

- [1] J. MARQUÉS, «LA DESCARBONIZACIÓN DE LA INDUSTRIA, RETOS Y OPORTUNIDADES,» *EVE*, p. 17, 2020.
- [2] NASA, «NASA,» 13 Enero 2022. [En línea]. Available: <https://www.nasa.gov/press-release/el-2021-empata-como-el-sexto-a-o-m-s-c-lido-en-la-tendencia-de-calentamiento-seg-n-un>.
- [3] D. Nuevo, «TECPA,» 15 Febrero 2022. [En línea]. Available: <https://www.tecpa.es/tipos-de-centrales-termosolares/>. [Último acceso: 21 Febrero 2022].
- [4] «DEPÓSITOS PARA ALMACENAR GAS NATURAL LICUADO A MUY BAJAS TEMPERATURAS,» [En línea]. Available: <https://docplayer.es/7494251-Depositos-para-almacenar-gas-natural-licuado-a-muy-bajas-temperaturas.html>.
- [5] C. Garrett, «Climate Selectra,» 20 04 2021. [En línea]. Available: <https://climate.selectra.com/es/ques/transicion-energetica>.
- [6] P. Energía, «Las emisiones de CO2 en el precio de la luz,» [En línea]. Available: <https://www.proximaenergia.com/las-emisiones-de-co2-en-el-precio-de-la-luz/>.
- [7] S. Alcalde, «National Geographic,» España, 19 julio 2021. [En línea]. Available: https://www.nationalgeographic.com.es/mundo-ng/revolucion-verde-union-europea-para-reducir-55-emisiones_17123.
- [8] Unión Europea, «Consejo Europeo,» 6 Diciembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.consilium.europa.eu/es/policias/climate-change/reform-eu-ets/>.
- [9] *Reducción de las emisiones de CO2 de los turismos nuevos y de los vehiculos comerciales ligeros nuevos*, 2021.
- [10] Unión Europea, «Movilidad limpia y sostenible para una UE climáticamente neutra,» 2021.
- [11] Iberdrola, *Almacenamiento Energético*, 2020.
- [12] Iberdrola, «CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE BOMBEO,» [En línea]. Available: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/central-hidroelectrica-bombeo#:~:text=C%C3%93MO%20FUNCIONA%20UNA%20CENTRAL%20HIDROEL%C3%89CTRICA%20DE%20BOMBEO&text=Este%20tipo%20de%20central%20el%C3%A9ctrica,satisfacer%20toda%20la%20demanda%20el%C3%A9ctrica..>
- [13] J. A. Roca, *Las 10 mayores centrales hidroeléctricas de bombeo del mundo*, 2017.
- [14] A. A. N. H. y F. P. , *State of the art of thermal storage for demand-side management*, ELSEVIER.
- [15] J. Lizana, R. Chacartegui y Á. Barrios-Padura, *Caracterización de materiales de almacenamiento de*

energía térmica para aplicaciones en edificación..

- [16] Wikipedia, «Almacenamiento de energía de aire comprimido,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Almacenamiento_de_energ%C3%ADa_de_aire_comprimido.
- [17] «Mundo Compresor,» [En línea]. Available: <https://www.mundocompresor.com/print/aplicaciones-curiosas-aire-comprimido-i-sistema-caes>.
- [18] INEEL, *Almacenamiento Mecánico (Volantes de Inercia)*, Morelos.
- [19] Twenergy, *Funcionamiento del volante de inercia como sistema de almacenamiento de energía*, 2019.
- [20] D. I. M. S. Ráez, «ACUMULADORES,» 2020.
- [21] D. P. R. ORTIZ, «EVALUACIÓN DE SUPERCONDENSADORES COMO SISTEMA DE,» 2020.
- [22] S. K. J. T. D. M. M. R. y E. K. S. , *Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power*, ELSEVIER.
- [23] D. B. Hidalgo, «Una Revisión sobre Materiales para Almacenamiento de Energía Solar Térmica,» Mayo 2018. [En línea]. Available: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-750X2018000200144&lng=en&nrm=iso.
- [24] «Diccionario MotorGiga,» [En línea]. Available: <https://diccionario.motorgiga.com/calor-especifico>.
- [25] N. Connor, «Qué es el almacenamiento de calor sensible – SHS – Definición,» 01 05 2020. [En línea]. Available: <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-el-almacenamiento-de-calor-sensible-shs-definicion/#:~:text=de%20calor%20sensible%20.-,El%20almacenamiento%20de%20calor%20sensible%20se%20basa%20en%20elevar%20la,mundo%20necesita%20son%20extremadamente%20grand>.
- [26] T. P. b. A. J. T. E. R. y Y. Z. , *Energy storage: Applications and challenges*, ELSEVIER.
- [27] «todoproduktividad,» 04 11 2012. [En línea]. Available: <http://todoproduktividad.blogspot.com/2012/11/tecnicas-de-almacenamiento-de-energia.html>.
- [28] A. Gill, M. Medrano, I. Martorell, A. Lázaro, P. Doblado, B. Zalba y L. F. Cabeza, *State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation.*, ELSEVIER.
- [29] M. H. S. B. y A. S. , *High-temperature hermak storage using a packed bed of rocks-Heat transfer analysis and experimental validation*, ELSEVIER.
- [30] V. A. S. C. E. M. G. M. G. A. M. R. D. M. F. G. D. M. y M. L. , *Thermal storage of sensible heat using concrete modules in solar*, ELSEVIER.
- [31] Cade, *Sistema de Almacenamiento de Energía Térmica en Hormigón*, SolidTES.
- [32] Y. J. F. Q. F. y Z. Wang, *Control strategy of the module concrete thermal energy storage for parabolic trough power plants*, ELSEVIER.
- [33] D. R. P. S. D. M. H. y M. S. , *Developmet and Perfomance Evaluation of High Temperature Concrete for*

Thermal Energy Storage for Solar Power Generation, 2012.

- [34] C. Suárez, F. J. Pino y J. Guerra, *A new simplified model for the unsteady response of concrete passive sensible TES systems*.
- [35] D. Laing, C. Bahl y T. Bauer, *High-Temperature Solid-Media Thermal Energy Storage for Solar Thermal Power Plants*.
- [36] I. Asesores, «Tipos de hormigones especiales para la edificación.» 2022. [En línea]. Available: <https://ingenierosasesores.com/actualidad/hormigones-especiales-aplicaciones-particulares-ii/>.
- [37] M. A. J. V. L. G. V. F.-L. M. S. y M. C.-P. , *Calcium aluminate based cement for concrete to be used as thermal energy storage in solar thermal electricity plants*.
- [38] O. O. F. G. G. V. S. C. M. L. Fambri, N. B. y R. D. M. , *Effect of nylon fibres on mechanical and thermal properties of hardened concrete for energy storage systems*.
- [39] F. G. G. D. M. V. S. C. M. y R. D. M. , *Recycled additions for improving the thermal conductivity of concrete in preparing energy storage systems*.
- [40] M. M. U. V. T. D. P. A. P. G. B. y N. C. , *New concentrating solar power facility for testing high temperature concrete thermal energy storage*.
- [41] ARRAELA. [En línea]. Available: <https://arraela.com/#contactar>.
- [42] E. Rojas, *Report on the desings and specifications of filler, tank and foundations*.
- [43] J. M. C. Rodado, *Nuevos Materiales y Sistemas de aprovechamiento energético*.
- [44] M. M. Rodriguez-Garcia, E. Rojas y J. M. Caruncho, *Thermal Storage Filler Material Distribution for the Polyphem Project*.
- [45] C. F. F. C. D. F. G. R. R. C. y R. D. M. , *Finite Element Method Modeling of Sensible Heat Thermal Energy Storage with Innovative Concretes and Comparative Analysis with Literature Benchmarks*.
- [46] L. D. S. W. T. R. y R. C. , *Solid media thermal storage for parabolic trough power plants*.
- [47] G. C. Z. J. Z. W. y C. W. , *Fabrication and thermal properties of a new heat storage concrete material*.
- [48] EnergyNest, «The Thermal Battery company,» 2019. [En línea]. Available: <https://energy-nest.com/technology/>.
- [49] N. Hoivik, C. Greiner, J. Barragan, A. Crespo Inista, G. Skeie, P. Bergan, P. Blanco Rodriguez y N. Calvet, *Long-term perfomance results of concrete-based modular thermal energy storage system*.
- [50] M. C. Guinea, *Criterios de diseño de un sistema de almacenamiento de energia termica en hormigon para aplicaciones industriales..*
- [51] V. Ruiz, «CADE se enorgullece de anunciar los seis primeros meses de operación del proyecto EDITOR para la producción de vapor solar,» [En línea]. Available: <https://cadeengineering.com/es/cade-anuncia-primeros-seis-meses-del-proyectoeditor-para-la-produccion-de-vapor-solar/>.

- [52] J. C. S. S. A. V. Ruiz y e. , *Operational experience and behaviour of a parabolic trough collector system with concrete thermal energy storage for process steam generation in Cyprus.*
- [53] J. C. S. S. A. V. Ruiz y e. , *Dynamic simulation model of a parabolic trough collector system with concrete thermal energy storage for process steam generation.*
- [54] D. Laing, W.-D. Steinmann, R. Tamme y C. Richter, *Solid media thermal storage for parabolic trough power plants.*
- [55] «IHA,» [En línea]. Available: [https://www.hydropower.org/factsheets/pumped-storage#:~:text=Pumped%20storage%20hydropower%20is%20the,\(GWh\)%20of%20electricity%20globally..](https://www.hydropower.org/factsheets/pumped-storage#:~:text=Pumped%20storage%20hydropower%20is%20the,(GWh)%20of%20electricity%20globally..)
- [56] A. de, «Apuntes de,» 2018. [En línea]. Available: <https://apuntesde.es/la-electrolisis/>.
- [57] C. Noya, «La producción mundial de baterías de litio se cuadruplica en cinco años por el impulso de los coches eléctricos,» 29 06 2020. [En línea]. Available: <https://forococheselectricos.com/2020/06/produccion-baterias-litio-mundo-2020.html>.
- [58] I. Ortega, *ALMACENAMIENTO TÉRMICO: EL CAMINO HACIA LA OPTIMIZACIÓN DE LA GESTIÓN ENERGÉTICA.*
- [59] A. Ruiz, *Las centrales termosolares con almacenamiento de energía, 2022.*
- [60] M. Ramirez, *Sistema de Almacenamiento Térmico Estacional.*
- [61] M. Karl, S. Rohani, P. Schöttl y F. Sasso, *Repor on the Overall Plant Layout.*

ÍNDICE DE CONCEPTOS

No se encuentran entradas de índice.

GLOSARIO

No se encontraron elementos de tabla de autoridades.

No se encuentran entradas de índice.