

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Tecnologías  
Industriales  
Intensificación energética

**Sistema pasivo de almacenamiento  
de energía térmica en centrales  
termosolares.**

Autor: María Brazo Reina

Tutor: Francisco Javier Pino Lucena

Departamento de Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016



Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales  
Intensificación energética

# **Sistema pasivo de almacenamiento de energía térmica en centrales termosolares.**

Autora:

María Brazo Reina

Tutor:

Francisco Javier Pino Lucena

Profesor Contratado Doctor

Departamento de Ingeniería Energética

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016

# Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría dar las gracias a Francisco Javier Pino Lucena, por confiarme este proyecto.

Gracias a cada uno de los miembros de la gran familia que me llevo de la facultad. Nosotros nos hemos apoyado en los malos momentos y disfrutado de los buenos. Gracias por esas tardes de biblioteca y noches de cenas y risas.

Gracias a mis grandes amigas, Luz y Marina. Quienes me han aportado esa parte de aire renovador cuando pensaba que las paredes de la facultad me consumían.

Gracias a David, por ayudarme en cada una de las asignaturas. Gracias, por ser mi almacén de serenidad, de apoyo, de fuerza, de ilusión, de risas y de amor.

Gracias a mi familia, quienes han estado apoyándome y preguntándome día a día como me iba.

Gracias a la persona que me ha hecho ser la mujer que soy hoy en día, por darme todo y más, por ser madre, padre y amiga en cada momento. Gracias a ti, mamá.

Antes de terminar, me gustaría agradecer este proyecto a las dos personas que siempre han estado, están y estarán en mi corazón, aunque ya no estén físicamente a mi lado. A mi padre y mi abuela.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

---

1	Introducción .....	11
1.1	Objetivos .....	11
1.2	Fundamentos de la energía .....	11
1.3	Radiación solar .....	12
1.4	Tecnologías solares .....	14
1.4.1	Energía fotovoltaica .....	14
1.4.2	Energía solar térmica.....	15
1.5	Energía termosolar de concentración .....	16
2	Sistemas de almacenamiento.....	19
2.1	Diseño a nivel de planta .....	20
2.2	Diseño a nivel de componente .....	20
2.2.1	Almacenamiento en calor sensible .....	22
2.2.2	Almacenamiento en calor latente .....	23
2.2.3	Almacenamiento termoquímico .....	24
2.3	Diseño a nivel de sistema .....	25
2.3.1	Sistema de dos tanques.....	26
2.3.2	Termoclima .....	26
2.3.3	Acumuladores de vapor.....	26
2.3.4	Sistemas con estructuras de transferencia de calor incorporadas o mejoradas....	27
2.3.5	Sistema de lecho fijo .....	27
2.3.6	Sistemas mixtos.....	27
3	Estado del arte del almacenamiento térmico en sólido .....	28
3.1	Evolución del hormigón .....	28
3.1.1	Hormigón reforzado con fibras .....	29
3.1.2	Hormigón con agregados geopolímeros.....	33
3.1.3	Hormigón de aluminio con agregados de grafito .....	34
3.1.4	Hormigón denominado “Heatcrete®” .....	36
3.2	Estudio comparativo de diferentes hormigones .....	38
3.2.1	Estudio del hormigón a alta temperatura.....	38
3.2.2	Estudio comparativo de diferentes mezclas .....	39
3.2.3	Estudio comparativo entre hormigones ligeros .....	43
3.2.4	Conclusiones de los estudios .....	46

3.3	Intercambiador de calor.....	46
3.3.1	Geometría del intercambiador de calor .....	46
3.3.2	Material del intercambiador de calor.....	48
3.3.3	Disposición de los tubos del intercambiador de calor .....	48
4	Control de un módulo de hormigón .....	50
4.1	Dos módulos.....	51
4.1.1	Modo de carga/descarga secuencial .....	51
4.1.2	Modo de carga modular.....	52
4.1.3	Modo de descarga modular .....	52
4.1.4	Modo de carga/descarga modular.....	53
5	Plantas con almacenamiento térmico de hormigón integrado .....	56
5.1	Proyecto WESPE.....	56
5.1.1	Descripción de la planta .....	56
5.1.2	Funcionamiento.....	58
5.2	Planta solar en Stuttgart (Alemania) .....	60
5.2.1	Descripción de la planta .....	60
5.2.2	Funcionamiento.....	62
5.3	Instituto Masdar Plataforma Solar (PSIM) en Abu Dabi .....	62
5.3.1	Descripción de la planta .....	64
5.3.2	Funcionamiento.....	64
6	Datos económicos y perspectivas.....	66
6.1	Análisis de ciclo de vida.....	67
7	Conclusiones .....	69
8	Bibliografía .....	71

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración. 1: Evolución sufrida y perspectiva de las energías renovables [IEA, 2016] .....	12
Ilustración 2 Reparto de la radiación solar [E.F. Camacho et al. 2012] .....	13
Ilustración 3 Mapa irradiación solar global.....	13
Ilustración 4 Componentes de la radiación [Pacco,2010] .....	14
Ilustración 5 Capacidad global de la tecnología fotovoltaica, 2004 – 2014, [REN21, 2015] .....	15
Ilustración 6 Incremento de la capacidad en la tecnología fotovoltaica en 2014, [REN21, 2015] .....	15
Ilustración 7 Esquema reflector Fresnel.....	17
Ilustración 8 Esquemas de diferentes estructuras termosolares. [William B.Stine et al., 2001] .	17
Ilustración 9 Evolución global de la capacidad de las plantas de concentración solar, [REN21, 2015] .....	18
Ilustración 10 Niveles del diseño de un sistema de almacenamiento.....	20
Ilustración 11 Agrupación de las familias de materiales en función de su conductividad térmica y densidad de energía [Fernández, 2001].....	21
Ilustración 12 Familias de materiales en función de su capacidad calorífica específica y el precio [Fernández, 2001] .....	22
Ilustración 13 Familia de los materiales más adecuados para el almacenamiento de calor sensible en función de la capacidad calorífica específica y el precio [Fernández, 2001] .....	23
Ilustración 14 Clasificación del tipo de almacenamiento.....	25
Ilustración 15 Microestructura de una muestra de hormigón reforzado con fibras de nylon después de 28 días de curación (a – c), y después de un tratamiento térmico a 250°C (d), 350°C (e) y 450°C (f). [Ozger, 2013] .....	32
Ilustración 16 Fibras de PET reciclado [Bae, 2010] .....	33
Ilustración 17 Variación del coeficiente de expansión térmica con la temperatura de hormigones con diferentes cantidades de grafito [Yuan, 2012].....	35
Ilustración 18 Resistencia mecánica según el porcentaje de grafito [Yuan, 2012] .....	36
Ilustración 19 Módulo de almacenamiento NEST después del test térmico [Bergan, 2014].....	37
Ilustración 20 Reducción de masa en el Heatcrete® durante un ensayo térmico [Matthieu, 2015]. .....	37
Ilustración 21 Resultados de la prueba mecánica [Panneer, 2012] .....	39
Ilustración 22 Representación gráfica de las propiedades térmicas de las diferentes mezclas [Ferone, 2014].....	40
Ilustración 23 Ciclo térmico de las diferentes mezclas a $V_{tot}$ constante [Ferone, 2014].....	41
Ilustración 24 Mapas de temperatura de contorno de las diferentes mezclas $V_{tot}$ constante durante la fase de carga (derecha) y la fase de descarga (izquierda) [Ferone, 2014].....	41
Ilustración 25 Ciclo térmico de las diferentes mezclas a $Q_{nom}$ constante [Ferone, 2014] .....	42

Ilustración 26 Mapas de temperatura de contorno de las diferentes mezclas a $Q_{nom}$ constante durante la fase de carga (derecha) y la fase de descarga (izquierda) [Ferone, 2014] .....	43
Ilustración 27 Representación gráfica de las propiedades térmicas de los hormigones ligeros y geopolímero [Ferone, 2014] .....	44
Ilustración 28 Ciclo térmico de las mezclas ligeras y geopolímera [Ferone, 2014] .....	45
Ilustración 29 Mapas de temperatura de contorno durante la fase de carga (derecha) y fase de descarga (izquierda) para las mezclas ligeras y geopolímeros [Ferone, 2014] .....	45
Ilustración 30 Tipología de intercambiadores aleteados .....	47
Ilustración 31 Distribución de temperatura de diferentes configuraciones de intercambiador de calor. [Panmeer, 2012] .....	47
Ilustración 32 Configuración de los intercambiadores utilizados en el ensayo anterior. ....	47
Ilustración 33 Distribución triangular del intercambiador de calor [Jian, 2015]. ....	49
Ilustración 34 Módulo de almacenamiento sólido [Jian, 2015] .....	50
Ilustración 35 Esquema del modo de carga/descarga secuencial [Jian, 2015] .....	52
Ilustración 36 Carga modular de un sistema de almacenamiento [Laing, 2010] .....	52
Ilustración 37 Modo de descarga modular [Laing, 2010] .....	53
Ilustración 38 Método de carga/descarga en paralelo. [Jian, 2015] .....	53
Ilustración 39 Energía eléctrica proporcionada en función de la configuración del sistema de almacenamiento en un planta de 50 MW [Laing, 2010] .....	54
Ilustración 40 Capacidad eléctrica en función de la configuración del sistema de almacenamiento [Tamme, 2003] .....	54
Ilustración 41 Conexión de los intercambiadores de calor en las unidades de almacenamiento [Laing, 2006] .....	57
Ilustración 42 Esquema de la planta solar del proyecto WESPE [Laing, 2006] .....	58
Ilustración 43 Distribución de las temperaturas en el módulo y del aceite térmico durante los dos ciclos [Laing, 2006] .....	59
Ilustración 44 Evolución de la potencia tanto del fluido térmico como de los módulos durante los dos ciclos [Laing, 2006] .....	59
Ilustración 45 Esquema general de la planta ANDASOL .....	60
Ilustración 46 Registro de tubo, base térmica y módulo finalizado y colocados del proyecto Stuttgart respectivamente [Laing, 2008] .....	61
Ilustración 47 Distribución del almacenamiento térmico para una planta tipo ANDASOL [Laing, 2008] .....	61
Ilustración 48 Comparación de los valores teóricos y reales del módulo del proyecto Stuttgart [Laing, 2008] .....	62
Ilustración 49 Esquema de un módulo de almacenamiento NEST [Bergan, 2014]. ....	63
Ilustración 50 Planta piloto PSIM en Abu Dabi [Bergan, 2014] .....	63
Ilustración 51 Esquema de la planta solar [Matthieu, 2015] .....	64

Ilustración 52 Partes de la planta solar [Matthieu, 2015].	64
Ilustración 53 P&ID simplificado de la planta piloto en Abu Dabi [Bergan, 2014].	65
Ilustración 54 Planta tipo ANDASOL- I con almacenamiento en sales fundidas (izquierda) y en hormigón (derecha)	67
Ilustración 55 Contribución de emisiones de CO <sub>2</sub> en la elaboración del hormigón [Zabalza, 2011]	67
Ilustración 56 Impacto medio ambiental producido por la planta ANDASOL- I utilizando sales fundidas como almacenamiento térmico [Laing, 2010]	68
Ilustración 57 Impacto medio ambiental de la planta ANDASOL- I usando hormigón como medio de almacenamiento [Laing, 2010]	68



# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades de los diferentes materiales utilizados en el almacenamiento de calor sensible [Kuravi, 2013] .....	23
Tabla 2 Propiedades de los materiales más utilizados en el almacenamiento en calor latente [Kuravi, 2013] .....	24
Tabla 3 Propiedades del hormigón para el almacenamiento térmico [A. Gil et al., 2010] .....	28
Tabla 4 Propiedades térmicas del hormigón a una tem [A. Gil et al., 2010] .....	29
Tabla 5 Composición de los cementos del estudio [Ozger, 2013] .....	30
Tabla 6 Capacidad térmica de ambas muestras a diferentes temperaturas [Ozger, 2013] .....	30
Tabla 7 Características mecánicas tras un ensayo [Ozger, 2013] .....	31
Tabla 8 Composición de las distintas mezclas de hormigón [Daniel, 2008].....	34
Tabla 9 Composición del hormigón de aluminio [Yuan, 2012].....	34
Tabla 10 Evolución de la conductividad térmica de la mezcla antes y después del tratamiento térmico (350°C durante 6h). La mezcla tiene un ratio agua/cemento del 0.3. [Yuan, 2012].....	34
Tabla 11 Evolución de la capacidad térmica volumétrica de la mezcla antes y después del tratamiento térmico (350°C durante 6h). La mezcla tiene un ratio agua/cemento del 0.3. [Yuan, 2012] .....	35
Tabla 12 Propiedades Heatcrete® A 400°C [Matthieu, 2015] .....	36
Tabla 13 Composición de las mezclas [Panneer, 2012].....	38
Tabla 14 Composición de las mezclas para la prueba mecánica [Panneer, 2012] .....	38
Tabla 15 Propiedades térmicas de las mezclas de estudio [Ferone,2014].....	40
Tabla 16 Propiedades de las mezclas durante la simulación $V_{tot}$ constante [Ferone, 2014].....	42
Tabla 17 Propiedades de las mezclas durante la simulación $Q_{nom}$ constante [Ferone, 2014].....	43
Tabla 18 Composición de las mezclas de estudio [Ferone, 2014] .....	44
Tabla 19 Propiedades térmicas de los hormigones ligeros [Ferone, 2014].....	44
Tabla 20 Valores obtenidos del estudio térmico para las mezclas ligeras y geopolímero [Ferone, 2014] .....	46
Tabla 21 Resultado de distintas configuraciones de aletas en intercambiadores de calor [Panneer, 2012] .....	48
Tabla 22 Propiedades del hormigón y fluido térmico [Jian, 2015] .....	51
Tabla 23 Condiciones y propiedades del estudio .....	51
Tabla 24 Propiedades de los materiales de almacenamiento [Laing, 2006].....	57
Tabla 25 Incremento de los parámetros de los módulos de almacenamiento de cerámica moldeable frente a los del hormigón de alta temperatura .....	60
Tabla 26 Parámetros de diseño.....	65
Tabla 27 Características de la planta [Laing, 2010] .....	66

Tabla 28 Datos económicos de las diferentes configuraciones de almacenamiento térmico en hormigón [Laing, 2010] .....	66
Tabla 29 Parámetros de la planta según el almacenamiento utilizado .....	67

## 1.1 OBJETIVOS

El sistema de almacenamiento de energía térmica en centrales termosolares es, hoy en día, una de las principales líneas de investigación en el mundo. Esto es debido a varias razones, la primera es debido a la posible escasez futura del carbón y al elevado precio que puede llegar alcanzar el petróleo. La segunda razón, es garantizar suministro eléctrico de manera estable y constante durante el tiempo que la planta termosolar no pueda generar. Por lo que, un buen sistema de almacenamiento de energía térmica debe poder suministrar la energía necesaria durante las horas de no radiación, así como garantizar elevados picos de energía momentáneos.

El objetivo principal de este proyecto es englobar de la manera más fielmente posible a la literatura, los avances tecnológicos obtenidos hasta la actualidad del uso del hormigón como material de almacenamiento de energía térmica en centrales termosolares. Además, se mostrará la manera más efectiva de realizar la instalación de los módulos de almacenamiento en una planta termosolar.

Por último, se mostrará las investigaciones y los resultados obtenidos en los proyectos llevados a cabo por el Centro Aeroespacial Alemán (DLR) y el Instituto Masdar en Abu Dabi.

## 1.2 FUNDAMENTOS DE LA ENERGÍA

La energía solar es una energía renovable que consiste en el aprovechamiento de la radiación solar que alcanza a la Tierra mediante diferentes tecnologías que han ido evolucionando a lo largo de los años.

El desarrollo de las tecnologías solares data a comienzos de los años 60 cuando se planteaba la posible llegada de la escasez del carbón. Sin embargo, el desarrollo de la energía solar se estancó a comienzos del siglo XX debido a una mayor disponibilidad y reducción de precio de las fuentes no renovables como el carbón y el petróleo. No obstante, las crisis de 1973 y 1979 provocaron un cambio importante de la política energética en todo el mundo, resurgiendo el interés en las tecnologías solares. La evolución de las tecnologías se vio apoyada por el nacimiento de programas de incentivos como el Federal Photovoltaic Utilization Program (EEUU) y el Sunshine Program (Japón) y de organizaciones de investigación como el NREL (EEUU), el NEDO (Japón) o el Fraunhofer-ISE (Alemania). Hoy en día según la publicación de *International Energy Agency* [IEA, 2016] en el año 2015, la generación de electricidad renovable a nivel mundial se estimó en un aumento de un 5% y representaron alrededor del 23% de la generación total.

En la ilustración 1 se representa la evolución tecnológica lograda hasta la actualidad y una previsión de la misma hasta el 2030 de las energías renovables. Centrándonos en la energía solar vemos que esta se encuentra diferenciada en energía fotovoltaica o solar y STE. Como se puede apreciar la energía fotovoltaica ha sufrido un mayor avance en los últimos años, alcanzándose unos valores de capacidades global alrededor de los 500 TWh mientras que la STE no supera los 30 TWh.



Ilustración. 1: Evolución sufrida y perspectiva de las energías renovables [IEA, 2016]

### 1.3 RADIACIÓN SOLAR

La mayor fuente sostenible de energía es el sol, el cual ofrece unos 174 PW de energía a la Tierra, de los cuales cerca del 30% es devuelto al espacio y el resto es absorbido por océanos, nubes y masas terrestres (Ilustración 2). La radiación directa solar que llega a la tierra es suficiente para satisfacer la demanda mundial de energía, por lo que para llegar a conseguir ese objetivo debemos

enfrentarnos previamente a lograr una forma eficiente de recoger, convertir, almacenar y utilizar dicha energía solar a precios competitivos.

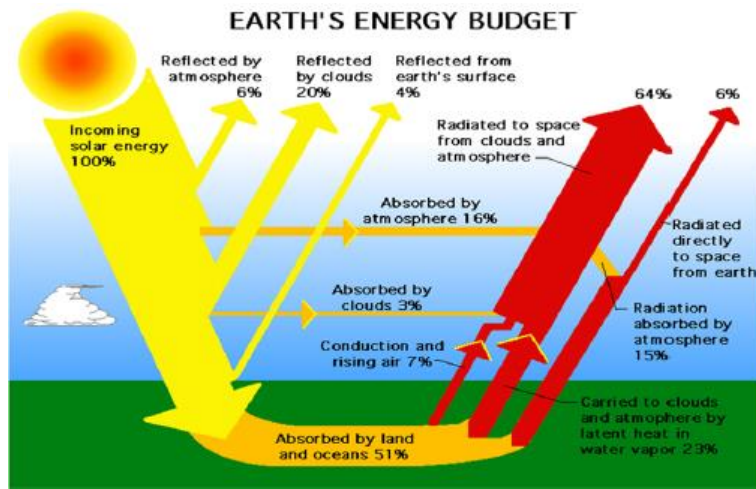


Ilustración 2 Reparto de la radiación solar [E.F. Camacho et al. 2012]

Ahora bien, la potencia capaz de obtener varía según el momento del día, las condiciones atmosféricas que la amortiguan y la latitud. En la ilustración 3 podemos observar la cantidad de radiación solar percibida en cada zona del planeta, alcanzándose los valores máximos de radiación en la zona central y disminuyendo el valor conforme nos alejamos en sentido norte y sur, siendo la disminución menos intensa hacia la segunda dirección. En condiciones de radiación aceptables, la potencia equivalente recibida es de 1000 W/m<sup>2</sup>.

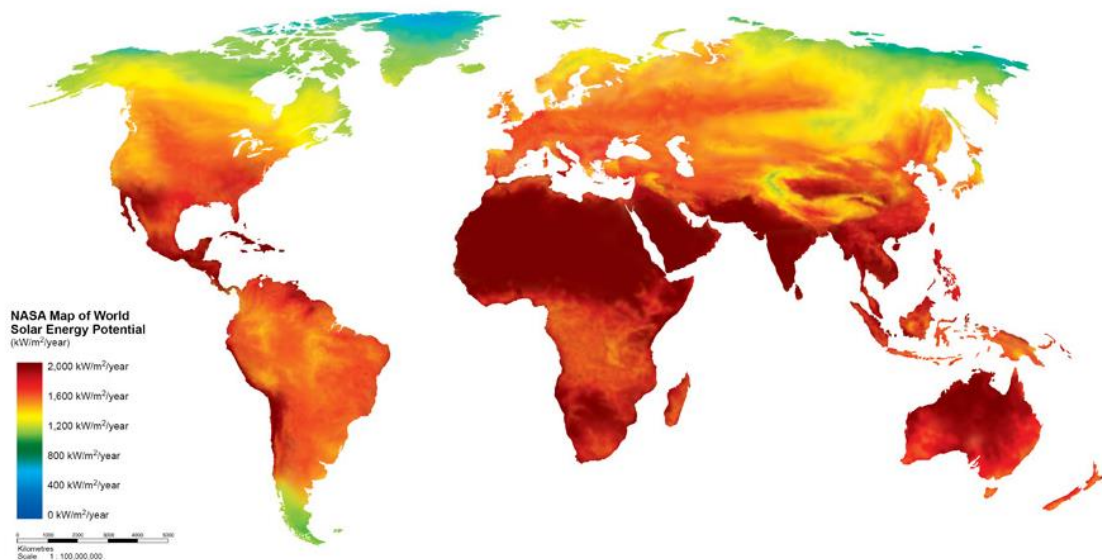
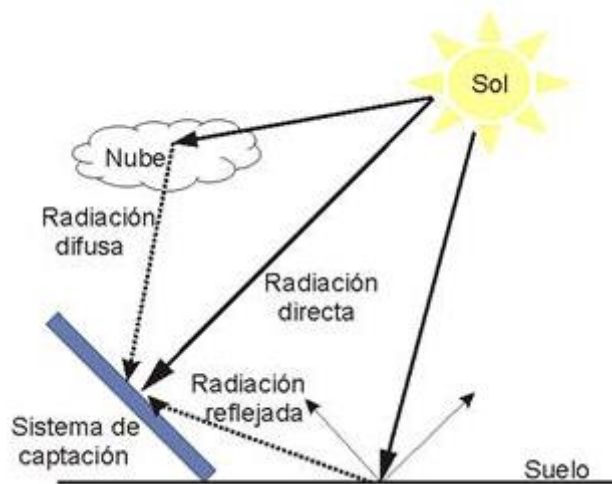


Ilustración 3 Mapa irradiación solar global

La radiación solar es aprovechable en sus componentes directos y difusos, o la suma de ambos según el tipo de colector utilizado. La radiación directa es la que llega directamente del foco solar, sin reflexiones o refracciones intermedias y puede reflejarse y concentrarse para su utilización, mientras que la radiación difusa es debida a los múltiples fenómenos de reflexión y refracción solar en la atmósfera y no es posible concentrar dicha luz difusa proveniente de diversas direcciones. En la ilustración 4 se realiza un esquema de la llegada de las diferentes componentes de la radiación solar a un sistema de captación.



*Ilustración 4 Componentes de la radiación [Pacco,2010]*

## **1.4 TECNOLOGÍAS SOLARES**

Las diferentes tecnologías solares se pueden clasificar en pasivas y activas, según cómo capturen, convierten y distribuyen la energía solar. Por un lado, las tecnologías pasivas no requieren de equipamientos mecánicos o eléctricos mientras que las activas si las necesitan.

Dentro del campo de las tecnologías activas nos encontramos 2 grupos, la energía fotovoltaica y la energía térmica, cuya diferencia entre ambas es que la energía fotovoltaica genera electricidad de forma directa a partir de la radiación solar, mientras que la energía térmica calienta un fluido intermedio. Este fluido puede ser almacenado y/o utilizado para generar agua caliente sanitaria (ACS) o electricidad, en función del nivel de temperatura al que trabajemos.

### **1.4.1 Energía fotovoltaica**

La energía solar fotovoltaica es una fuente de electricidad obtenida directamente a partir de la radiación solar.

Este tipo de energía se utiliza para alimentar diversos aparatos autónomos o abastecer a viviendas aisladas de la red eléctrica, además de para producir electricidad a gran escala a través de redes de distribución. Por ello, es una de las tecnologías que más ha crecido en los últimos 15 años, proclamándose como la tercera fuente de energía renovable más importante en términos de capacidad instalada a nivel global. La producción anual de energía eléctrica generada, ilustración 5, mediante esta fuente de energía a nivel mundial equivalía en 2015 a cerca de 184 TWh, suficiente para cubrir aproximadamente un 1 % de la demanda mundial de electricidad.

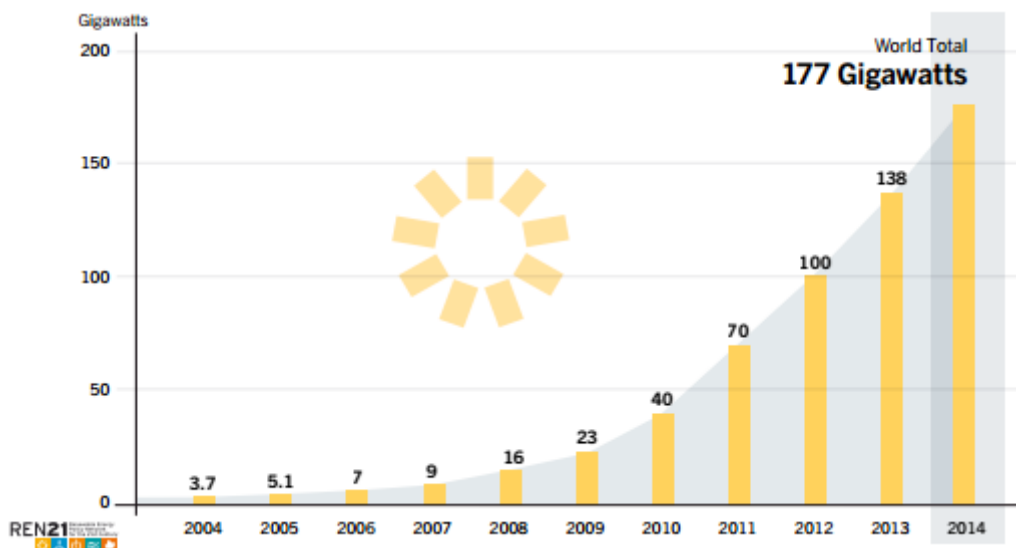


Ilustración 5 Capacidad global de la tecnología fotovoltaica, 2004 – 2014, [REN21, 2015]

La exponencial evolución se ha visto favorecida por la reducción constante del coste de la energía solar fotovoltaica desde sus inicios, aumentando a su vez la eficiencia, y logrando que su coste medio de generación eléctrica sea ya competitivo con las fuentes de energía convencionales. Además de programas de incentivos para su instalación en países de todo el mundo. A continuación, en la ilustración 6 se muestra la evolución de la tecnología fotovoltaica que ha tenido lugar en 2014, en lo que se refiere a su capacidad, en las 10 ciudades que encabezan el ranking de dicha evolución.

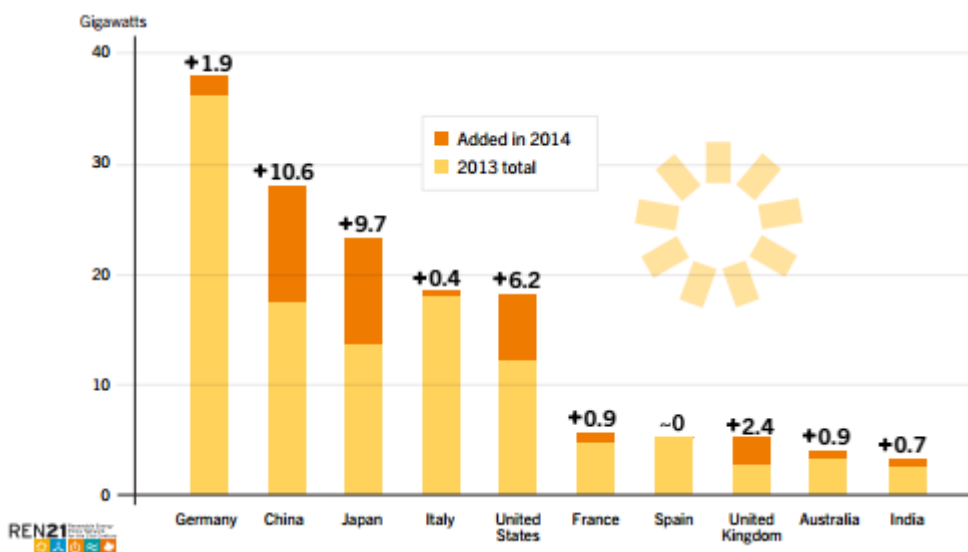


Ilustración 6 Incremento de la capacidad en la tecnología fotovoltaica en 2014, [REN21, 2015]

### 1.4.2 Energía solar térmica

La energía solar térmica consiste en el aprovechamiento de la energía solar para producir calor o energía mecánica y a partir de esta última energía eléctrica. Los colectores de energía térmica se pueden clasificar en:

- Colector de baja temperatura

Este tipo de colectores alcanzan temperaturas comprendidas entre los 35°C y los 60°C. Representan a la tecnología solar fototérmica y su principal aplicación en la generación de agua caliente sanitaria (ACS), también se utilizan para el secado de productos agropecuario<sup>1</sup>.

- Colector de media temperatura

Los colectores de media temperatura trabajan con temperaturas de hasta 300°C. La aplicación de este tipo de colectores engloba tanto el secado de madera para la construcción como el secado de alimentos tales como frutas, granos, pescados incluso cultivos.

- Colectores de alta temperatura

Los colectores de alta temperatura, son capaces de alcanzar temperaturas de hasta 2000°C. Para este tipo de colectores, el cual nos es de interés para este estudio, realizaremos su análisis en un apartado propio.

### 1.5 ENERGÍA TERMOSOLAR DE CONCENTRACIÓN

La energía solar térmica utiliza espejos o lentes para concentrar una gran cantidad de luz sobre una pequeña superficie. La energía eléctrica es producida cuando la luz concentrada es convertida en calor, que impulsa un motor térmico conectado a un generador de electricidad.

Las tecnologías de concentración existentes producen diferentes temperaturas máximas con sus correspondientes eficiencias termodinámicas, debido a las diversas formas en que ellos siguen al sol y enfocan la luz.

- Concentrador solar cilíndrico parabólico

Las plantas de energía cilíndrico-parabólico usan un espejo cilíndrico curvado para reflejar la radiación solar directa sobre un tubo de vidrio que contiene el fluido a calentar ubicado a lo largo del cilindro, posicionado en el punto focal de los reflectores. El concentrador solar es capaz de seguir al sol durante el día de tal forma que la radiación directa permanece enfocada en el receptor. Sin embargo, los cambios estacionales en el ángulo de incidencia de la luz solar no requieren ajustar los espejos, dado que simplemente la radiación es concentrada en otra parte del receptor, de esta forma el diseño no necesita hacer seguimiento en un segundo eje. Una vez que el fluido se ha calentado (alcanza temperaturas entre 150°C y 350°C) es transportado a un motor térmico donde esa energía es transformada en electricidad. Un esquema de este tipo de concentrador puede verse en la ilustración 8.

Es una de las tecnologías más desarrolladas dentro del campo de las plantas de concentración solar. Las principales centrales de esta tecnología son: *Solar Energy Generating Systems* (SEGS) en California tiene una capacidad de 350MW, *Nevada Solar One* en Nevada con una capacidad de 64MW y *Andasol* en Europa con una capacidad de 50MW.

- Reflectores Fresnel

Compuestos por hileras de espejos delgados y planos que concentran la luz solar sobre los tubos que conducen el fluido a calentar. Posee mayor superficie reflectante con la misma cantidad de espejos que los cilíndricos parabólicos debido a que estos al ser planos son capaces de capturar

---

<sup>1</sup> Agropecuario – Relativo a la agricultura y a la ganadería



más luz solar. Por otra parte, son más baratos que los anteriores debido, principalmente, a que los espejos comparten receptores y al no necesitar, los espejos, sostener los receptores sus estructuras son más simples. Un esquema de este tipo de concentradores puede verse en la ilustración 7 que se muestra a continuación.

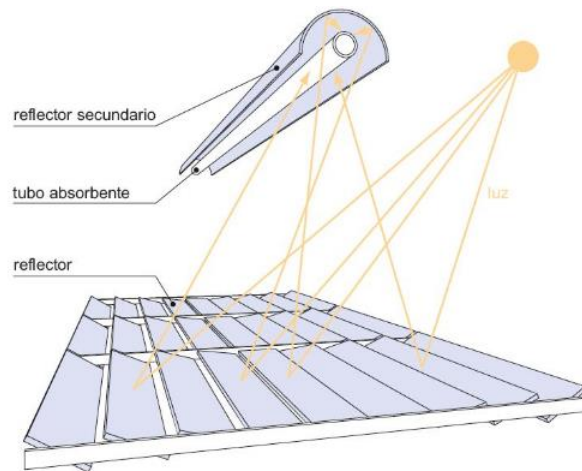


Ilustración 7 Esquema reflector Fresnel

- Disco Stirling

Un disco Stirling consiste en un reflector parabólico único que concentra la luz en un receptor posicionado en el punto focal del reflector. El reflector sigue la posición del sol en dos ejes para mantenerse perpendicular a la radiación incidente en él. El fluido de trabajo es calentado entre 250 °C y 700 °C y, posteriormente, el motor Stirling transforma esta energía térmica en electricidad. Este tipo de tecnología es la más eficiente de los concentradores solares, entre 31% y 32%. Un esquema del mismo se muestra en la ilustración 8.

- Torre

La constitución de una central solar de torre consiste en un conjunto de reflectores (heliostatos) con capacidad de seguimiento en dos ejes, que concentran la radiación solar sobre un receptor central instalado en una torre. El receptor contiene el fluido de trabajo, el cual puede llegar a alcanzar temperaturas entre 500°C y 1000°C. El desarrollo de las centrales solares de torre está menos avanzado que los sistemas cilíndricos parabólicos, pero ofrecen una mayor eficiencia y una mejor capacidad de almacenamiento de energía. En la ilustración 8 se detalla un esquema de una planta solar de torre central.

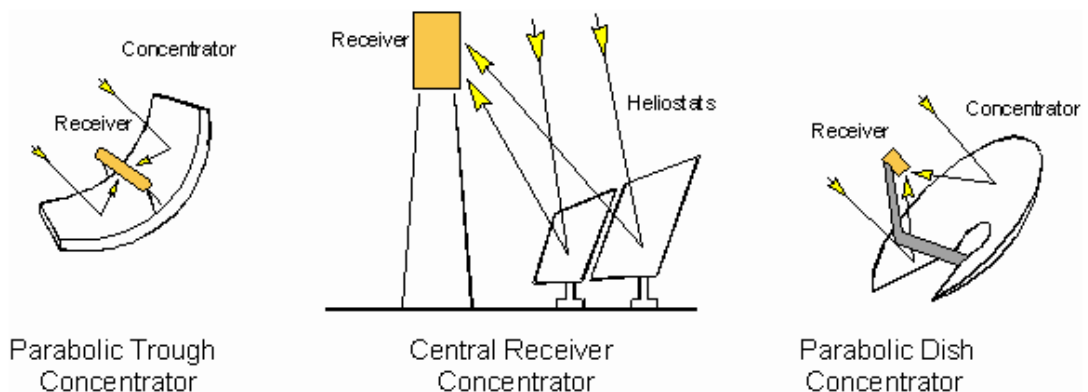
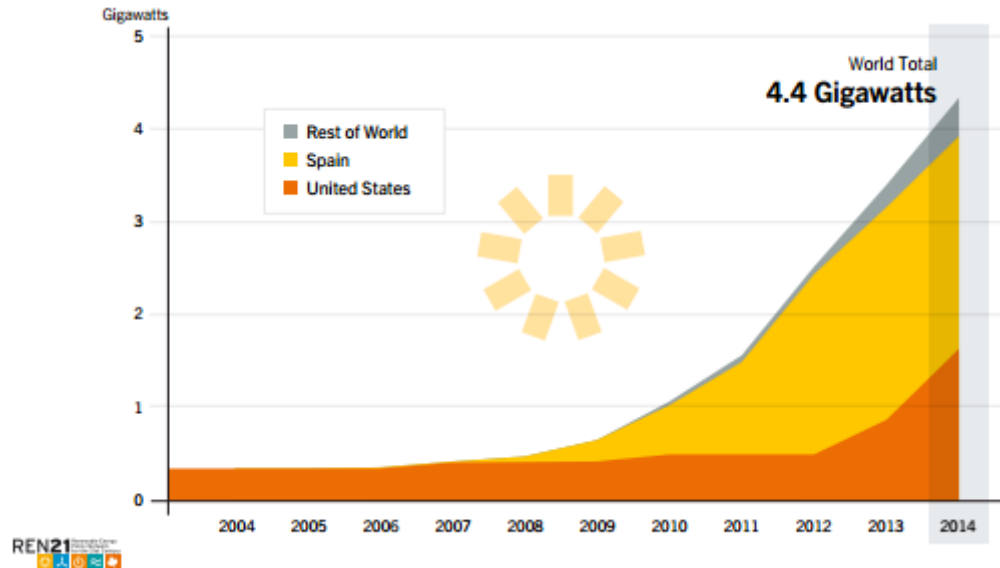


Ilustración 8 Esquemas de diferentes estructuras termosolares. [William B.Stine et al., 2001]

Algunas de las centrales construidas en todo el mundo destacan la Acme Solar Thermal Tower de 2.5MW en India, PS10, PS20 y GemaSolar las cuales generan una potencia de 10MW, 20MW y 19.9MW respectivamente en España y Sierra Sun Tower de 5MW en Estados Unidos.

La evolución de las plantas de concentración de energía solar global en lo referente a la capacidad queda representada en la ilustración 9 que se muestra a continuación.



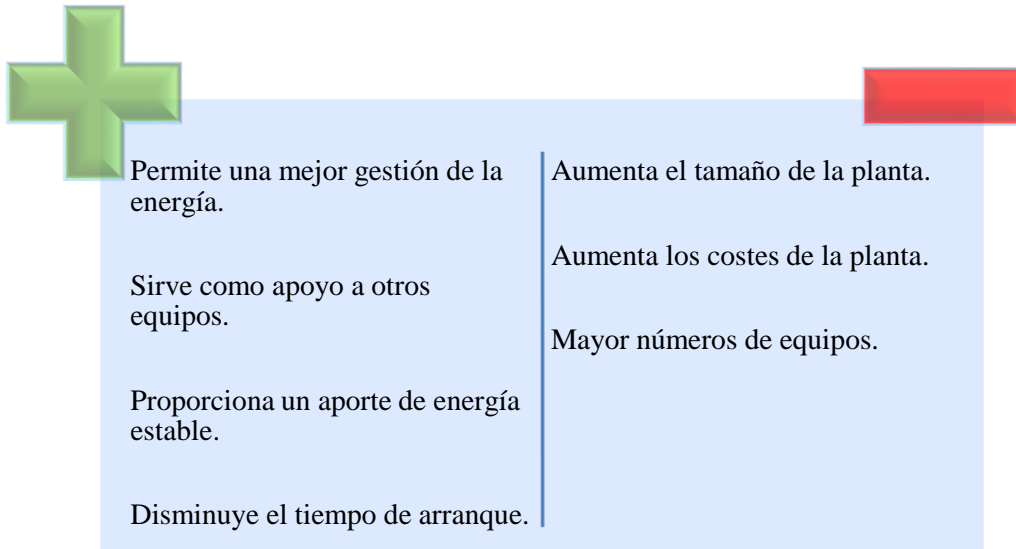
*Ilustración 9 Evolución global de la capacidad de las plantas de concentración solar, [REN21, 2015]*

La entrada de energía solar no siempre es constante, ya que depende como comentamos anteriormente de los cambios de insolación diurna, estacionales y climáticos. Por tanto, y para hacer frente a estas fluctuaciones se procede a la utilización de un sistema de almacenamiento.

Los sistemas de concentración de energía térmica (CSP) son los únicos generadores de energía renovable que pueden ser fácilmente acoplados a un sistema de almacenamiento de energía térmica (TES) garantizando así las exigencias del mercado, ya sea durante los periodos de máxima demanda como los periodos estacionales. Además, mejora el factor de la capacidad anual de la planta, ya que garantiza el suministro eléctrico en fracciones del día que no existe insolación. En este trabajo se realizará un estudio detallado de los sistemas de almacenamientos mostrando especial atención a los sistemas de almacenamiento en sólidos.

## 2 SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO

El papel que juega los sistemas de almacenamientos es vital para el funcionamiento permanente de una central de energía térmica. A continuación, se muestran las principales ventajas e inconvenientes de la utilización de un sistema de almacenamiento.



Un sistema de almacenamiento de energía térmica consta principalmente de tres partes, el medio de almacenamiento que se realiza en modo de calor sensible, latente y/o en reacciones químicas reversibles, el mecanismo de transferencia de calor, encargado de suministrar o extraer el calor del medio de almacenamiento y los sistemas de contención, los cuales engloban los equipos de transferencia de energía y aísla el sistema de los alrededores.

El diseño de los sistemas de almacenamiento consta de tres niveles, ilustración 10, a nivel de planta donde se centra en los requisitos para satisfacer las necesidades de la planta y en la integración del almacenamiento con los diferentes sistemas, a nivel de componentes, el cual se centra en los componentes básicos del sistema de almacenamiento y, por último, a nivel de sistema donde se realiza una perfecta integración de los componentes buscando perfeccionar su funcionamiento en conjunto.



*Ilustración 10 Niveles del diseño de un sistema de almacenamiento*

## 2.1 DISEÑO A NIVEL DE PLANTA

Una central termosolar utiliza ciclos de potencia termodinámicos convencionales y, como tal, la eficiencia del bloque de potencia depende principalmente de la temperatura de funcionamiento. La cantidad de energía eléctrica producida es función de la insolación directa normal anual ( $MWh/m^2$ ) captada por el campo solar, la eficiencia de esa captación, las pérdidas térmicas, la eficiencia neta del ciclo de potencia y, en el caso de haber almacenamiento, de su eficiencia. La eficiencia de la unidad de almacenamiento depende a su vez del tipo de almacenamiento, el cual se discutirá más adelante.

Por tanto, la presencia de un sistema de almacenamiento afectará al rendimiento final de la planta ya que debe trabajar conjuntamente con el campo solar y con el bloque de potencia, por lo que la incorporación de un sistema de almacenamiento requiere de la evaluación tanto de los aspectos térmicos como económicos de la planta.

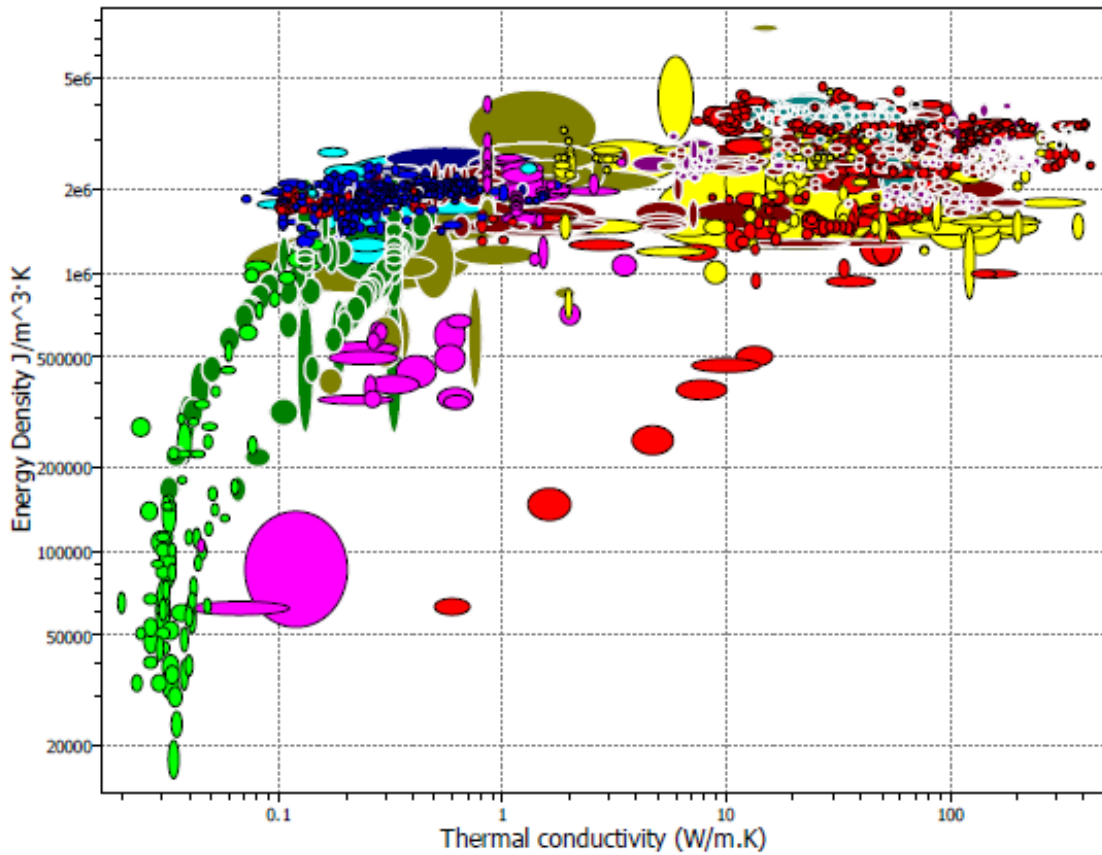
Además de su influencia en el rendimiento, afectará a la eficiencia. Para obtener una mayor eficiencia, la planta debe ser capaz de ir a temperaturas elevadas y el sistema de almacenamiento ser capaz de almacenar en las temperaturas requeridas y ser compatible con el resto de las consideraciones de los componentes termodinámicos.

## 2.2 DISEÑO A NIVEL DE COMPONENTE

El diseño a este nivel engloba la selección del material de almacenamiento, el material de contención y el fluido de transferencia de calor, además de una perfecta unión entre ellos.

El medio de almacenamiento debe poseer unas propiedades, costes y estabilidad térmica y química tales, que garanticen un número elevado de ciclos térmicos. Las propiedades termofísicas primordiales a la hora de elegir un material son la densidad, la capacidad y conductividad térmica, el coeficiente de expansión térmico y garantizar una estabilidad cíclica, así como la disponibilidad del material, los costes y los métodos de producción.

Generalmente se utilizan los siguientes tipos de ilustraciones para la selección adecuada del material de almacenamiento. En las ilustraciones. 11, 12 y 13 observamos la familia de materiales más utilizados en la industria y más específicamente en el almacenamiento en calor sensible. En estas gráficas se enfrentan las propiedades más significativas en el uso como almacenamiento de energía térmica. En primer lugar, en la ilustración. 11, observamos como la conductividad térmica aumenta conforme lo hace la densidad energética del material, siendo la familia de los metales los mejores transmisores de la energía.



*Ilustración 11 Agrupación de las familias de materiales en función de su conductividad térmica y densidad de energía [Fernández, 2001]*

Por otro lado, para la selección de un material es imprescindible que sea lo más económico posible y para ello se utilizan las ilustraciones. 12, en donde se representa las familias de materiales en función de su capacidad calorífica específica frente al precio por unidad de masa. En ella, observamos que los materiales más adecuado son los hormigones y cementos, por ser el que presenta la pareja de valores más adecuados para su uso como almacenamiento de energía térmica.

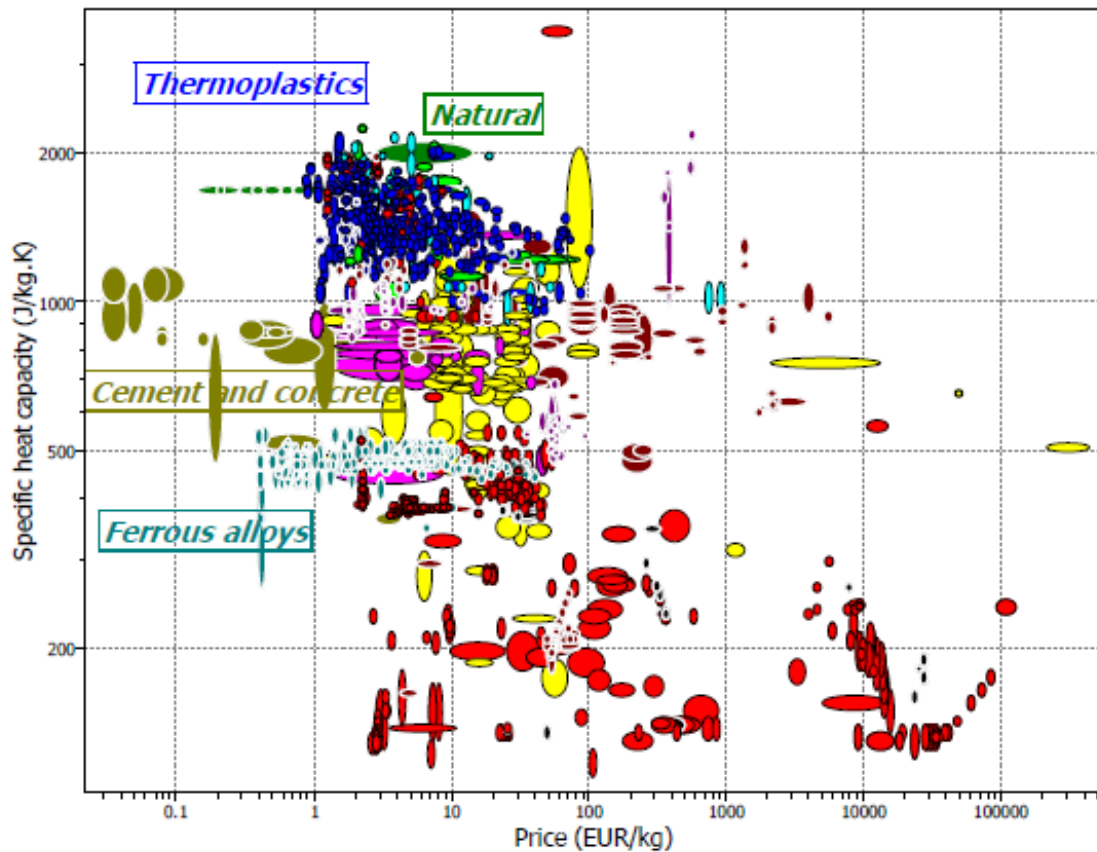


Ilustración 12 Familias de materiales en función de su capacidad calorífica específica y el precio [Fernández, 2001]

### 2.2.1 Almacenamiento en calor sensible

Los sistemas de almacenamiento en calor sensible elevan la temperatura de un medio, ya sea sólido o líquido, sin producirse un cambio de fase en el rango de temperatura de trabajo. El almacenamiento en calor sensible depende principalmente de la capacidad calorífica, la energía y a difusividad térmica. La cantidad de energía almacenada se puede calcular a partir de la siguiente expresión:

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

Observamos que depende de la masa del medio de almacenamiento, el calor específico del material y de la diferencia de temperatura del proceso. Los diferentes tipos de materiales utilizados en el almacenamiento sensible se detallan en la tabla 1.

$T_{cold}$ (°C)	$T_{hot}$ (°C)	Material	Thermal conductivity (W/m k)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Average specific heat capacity $c_p$ (kJ/kg K)	Volumetric specific heat capacity (kWh <sub>th</sub> /m <sup>3</sup> )	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

Tabla 1 Propiedades de los diferentes materiales utilizados en el almacenamiento de calor sensible [Kuravi, 2013]

En la ilustración. 13 se representa los materiales más utilizados para el almacenamiento de calor sensible en función de su capacidad calorífica específica frente a su precio por unidad de masa. El hormigón es el material con la mayor capacidad calorífica específica en relación a su bajo coste, y es, por ese motivo, la iniciativa de su desarrollo para el almacenamiento de energía térmica.

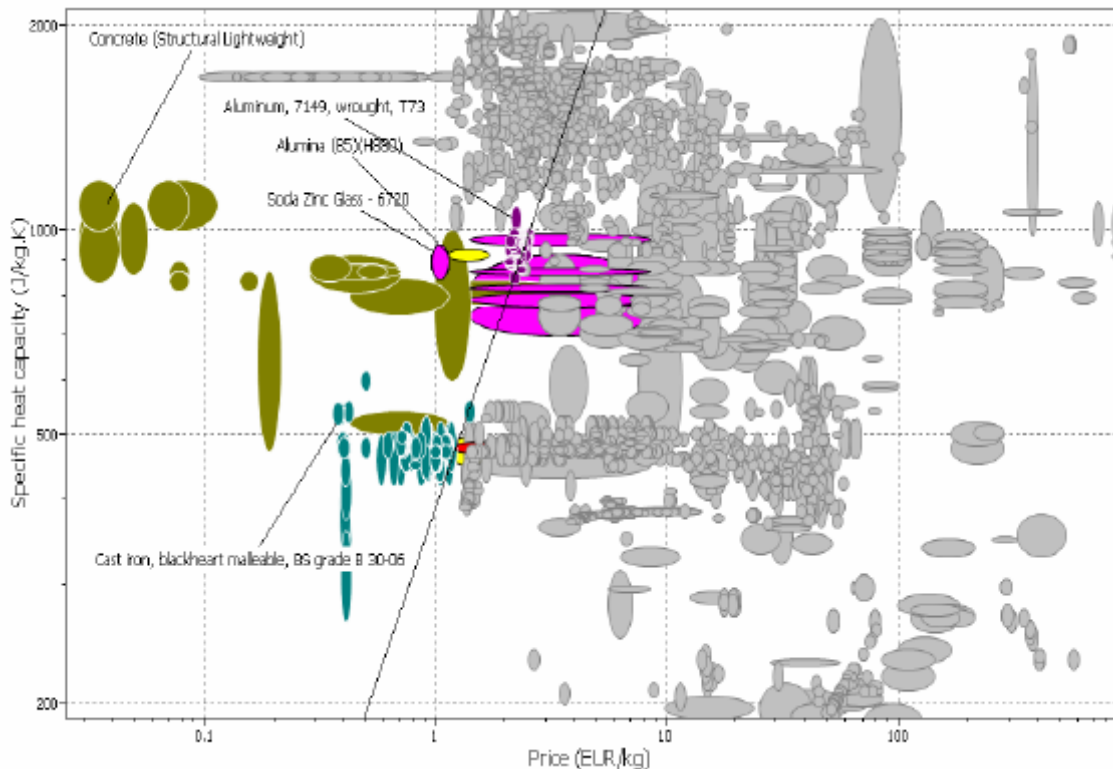


Ilustración 13 Familia de los materiales más adecuados para el almacenamiento de calor sensible en función de la capacidad calorífica específica y el precio [Fernández, 2001]

### 2.2.2 Almacenamiento en calor latente

Los sistemas de almacenamiento en calor latente utilizan materiales que cambian de fase a una temperatura que cae dentro del rango de temperaturas de trabajo. Los posibles cambios de fases que pueden realizarse son sólido-sólido, líquido-vapor y sólido-líquido, siendo este último el más utilizado debido a su baja expansión volumétrica en comparación con las otras. La cantidad de energía almacenada puede ser calculada a partir de la expresión siguiente:

$$Q = m * [c_{ps} * (T_m - T_s) + h + c_{pl} * (T_l - T_m)]$$

Esta expresión depende de los calores específicos en los estados sólido y líquido, las temperaturas del estado sólido, líquida y del medio de almacenamiento y de la entalpía de cambio de fase. Este último término puede proporcionar cantidades de almacenamiento mayores que los obtenidos por el sensible, además de ser más eficiente y menores costes. En la tabla 2 se detallan las propiedades de los materiales más utilizados en el almacenamiento latente.

Una de las características importantes de los materiales es poseer una buena estabilidad térmica y química, es decir, el material no debe degradarse después de miles de ciclos térmicos ni descomponerse al ser calentado.

$T_{melt}$ (°C)	Material	Latent heat of fusion (J/g)	Thermal conductivity (W/m K)
307	NaNO <sub>3</sub>	177	0.5
318	77.2 mol% NaOH–16.2% NaCl–6.6% Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	290	
320	54.2 mol% LiCl–6.4% BaCl <sub>2</sub> –39.4% KCl	170	
335	KNO <sub>3</sub>	88	0.5
340	52 wt% Zn–48% Mg	180	
348	58 mol% LiCl–42% KCl	170	
380	KOH	149.7	0.5
380	45.4 mol% MgCl <sub>2</sub> –21.6% KCl–33% NaCl	284	
381	96 wt% Zn–4% Al	138	
397	37 wt% Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> –35% K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> –Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	275	2.04
443	59 wt% Al–35% Mg–6% Zn	310	
450	48 wt% NaCl–52% MgCl <sub>2</sub>	430	0.96
470	36 wt% KCl–64% MgCl <sub>2</sub>	388	0.83
487	56 wt% Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> –44% Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	368	2.11
500	33 wt% NaCl–67% CaCl <sub>2</sub>	281	1.02
550	LiBr	203	
632	46 wt% LiF–44% NaF <sub>2</sub> –10% MgF <sub>2</sub>	858	1.20
660	Al	398	250
714	MgCl <sub>2</sub>	452	

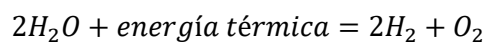
Tabla 2 Propiedades de los materiales más utilizados en el almacenamiento en calor latente [Kuravi, 2013]

### 2.2.3 Almacenamiento termoquímico

Un sistema de almacenamiento termoquímico es aquel que utiliza energía térmica para romper los enlaces químicos de una manera reversible. La ruptura del enlace requiere de una elevada cantidad de energía, lo que resulta un sistema de almacenamiento ideal para grandes cantidades de energía con poca cantidad de material.

El producto originado por la reacción es, generalmente, irreversible a temperatura ambiente, por lo que la energía puede permanecer almacenada de forma indefinida sin producirse pérdidas a temperatura ambiente.

Un ejemplo de este tipo de almacenamiento es la disociación térmica del agua. El agua a temperaturas superiores a los 2000°C comienza a disociarse en hidrógeno y oxígeno.



Si la reacción inversa se realiza a temperaturas bajas se requiere de un catalizador, por lo que a temperatura ambiente no reaccionará y a temperaturas elevadas dicha reacción evoluciona de forma explosiva.

Este tipo de sistemas es muy interesante teóricamente, pero aún se encuentra lejos de ser desarrollada para su uso como almacenamiento en centrales termosolares, ya que no se puede



predecir la reversibilidad a largo plazo de las reacciones ni los efectos de los productos químicos en los materiales que constituyen el recipiente que contienen a dichas reacciones.

Una vez establecido el tipo de almacenamiento se debe identificar el tipo de material que se utilizará para los tanques de almacenamiento, el fluido de transferencia de calor y, en casos de necesitarlos, encapsulación. El material seleccionado debe aportar al sistema de almacenamiento fuerza, flexibilidad, resistencia a la corrosión y estabilidad térmica sin obstaculizar la transferencia de calor entre el HTF y el material utilizado para el almacenamiento. Además, el sistema de almacenamiento debe poseer de un aislamiento apropiado que minimice las pérdidas con el entorno.

Uno de los principales problemas a la hora de seleccionar el material es la corrosión. Este fenómeno se ve agravado con al trabajar con elevadas temperaturas. La corrosión disminuye el ciclo de vida del sistema, llegando a afectar al rendimiento térmico del sistema.

Los fluidos de transferencia más utilizados son fluidos a base de aceite orgánicos, aire, agua, sales fundidas e, incluso, fluidos basados en nano-partículas. Cada uno de estos fluidos tienen sus ventajas e inconvenientes, ya que, por ejemplo, las sales inorgánicas mantienen estabilidad a altas temperaturas, pero solidifican fácilmente a temperaturas por debajo de los 230°C, mientras que los HTF a base de aceites orgánicos se descomponen alrededor de los 400°C.

### 2.3 DISEÑO A NIVEL DE SISTEMA

La construcción y situación de todos los equipos que conforman el sistema de almacenamiento determinan el comportamiento térmico y, por tanto, la eficiencia de la planta.

Los almacenamientos de energía térmica se diferencian en activos y pasivos, dependiendo de si el medio de almacenamiento es fluido o sólido respectivamente. A su vez, el almacenamiento tipo activo se agrupan en directos o indirectos, en función de si el medio de almacenamiento se utiliza como fluido de transferencia de calor (directos) o ambos fluidos son diferentes (indirectos). La ilustración 14 muestra las diversas configuraciones de los sistemas de almacenamiento térmico, los cuales serán detallados brevemente en los apartados siguientes.

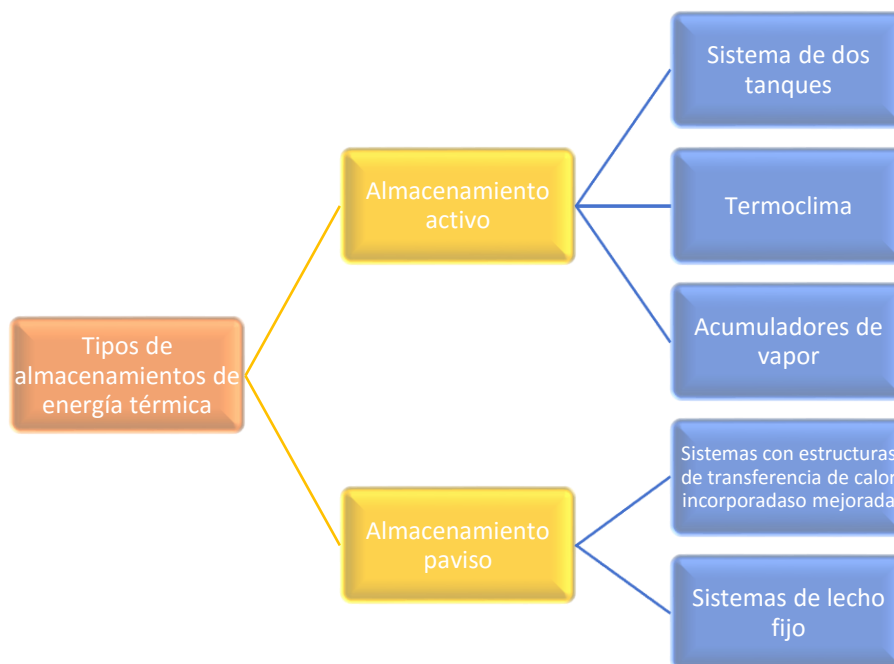


Ilustración 14 Clasificación del tipo de almacenamiento

### 2.3.1 Sistema de dos tanques

El sistema de almacenamientos basados en la utilización de dos tanques son los más utilizados en la industria y, generalmente se encuentra unido a la utilización de sales fundidas o aceites sintéticos como fluido HTF.

La cantidad de calor almacenada viene determinada por la cantidad de energía suministrada por el campo solar. El tanque de almacenamiento debe ser capaz de almacenar la cantidad de líquido necesario y soportar la expansión/contracción térmica asociada a miles de ciclos. Además, es imprescindible una óptima selección del material de almacenamiento para minimizar las pérdidas y, con ellas, la influencia negativa en el rendimiento del ciclo de potencia. El material de almacenamiento depende de la temperatura de operación de la planta y del diseño del intercambiador.

El coeficiente global de transferencia (U) de un intercambiador trabajando en condiciones de diseño se determina a partir de la siguiente expresión

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{1}{h_o A_o} + \frac{R''_{fo}}{A_o} + \frac{R''_{fi}}{A_i} + \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2\pi k L}$$

h: Coeficiente de transferencia de calor

A: Área superficial

R<sub>0''</sub>: Factor de ensuciamiento

D: Diámetro del tubo

Subíndices i y 0: Indican el tubo interior y exterior respectivamente

Pero en un campo solar, las condiciones de trabajo varían, por lo que usualmente se trabaja en unas condiciones distintas a las de diseño. Para estos casos el coeficiente global de transferencia se aproxima a la siguiente expresión

$$\frac{UA}{UA_{ref}} = \left(\frac{\dot{m}}{\dot{m}_{ref}}\right)^{0.8}$$

### 2.3.2 Termoclima

Los sistemas que utilizan un único tanque para almacenar el fluido se denominan termoclinas, debido al gradiente térmico que se desarrolla dentro de él. Es decir, el fluido caliente se establece en la zona superior y conforme se va enfriando se va desplazando a la zona inferior del tanque.

### 2.3.3 Acumuladores de vapor

El medio de almacenamiento de este tipo de sistema es el agua. En un principio contiene una mezcla de agua/vapor saturado a una cierta presión y cuando se realiza el proceso de la carga, este puede influenciar de dos maneras distintas en sus condiciones operativas. Por un lado, si cargamos el sistema con vapor sobrecalentado, la temperatura y la presión del tanque aumenta, cambiando el estado de saturación de la masa inicial. Por otra parte, si cargamos al sistema con líquido saturado la presión y la temperatura se mantienen constante incrementándose el volumen másico. La descarga del sistema se lleva a cabo mediante la reducción de la presión en el tanque de almacenamiento.

### **2.3.4 Sistemas con estructuras de transferencia de calor incorporadas o mejoradas**

Este tipo de sistemas de almacenamiento puede ser utilizados para altas y bajas temperaturas. Este sistema se basa en la utilización de hormigón como medio de almacenamiento con un intercambiador de calor integrado en su interior, por lo que para cargar el sistema el fluido que sale calentado del campo solar atraviesa el intercambiador transfiriendo su energía al hormigón y para la descarga el fluido frío atraviesa dicho intercambiador en sentido contrario absorbiendo el calor almacenado. El hormigón utilizado normalmente es reforzado con la adición de otros componentes como el grafito o el aluminio. Un estudio más detallado se realizará en el apartado.3.

Este tipo de almacenamiento es característico por su reducido coste, siendo el intercambiador de calor el que participa en mayor medida.

### **2.3.5 Sistema de lecho fijo**

El sistema de lecho fijo adquiere diversas configuraciones, pero el funcionamiento siempre es el mismo, el fluido calorportador fluye a través de sus elementos realizando la transferencia de calor al material de almacenamiento, el cual se encuentra en contacto directo con él. El material de almacenamiento son grandes conductores, tales como rocas, minerales o materiales de cambio de fase encapsulados.

En un sistema de lecho fijo hay diversos modos de transferencia de calor

- Convección entre las paredes y el fluido
- Convección entre las partículas que conforman el lecho y el fluido
- Conducción entre las paredes y las partículas
- Conducción entre las partículas
- Radiación entre el almacenamiento y los equipos del entorno

Por tanto, podemos concluir diciendo que la conductividad térmica de un lecho es un parámetro que depende tanto de las propiedades térmicas como de la velocidad del fluido y con ello, el rendimiento de este tipo de sistemas de almacenamiento depende fuertemente del coeficiente de transferencia de calor.

### **2.3.6 Sistemas mixtos**

La mayoría de las centrales termosolar utilizan un único sistema de almacenamiento de energía térmica, aunque el uso de múltiples sistemas tiene muchos beneficios. Un ejemplo de ello es cuando trabajamos con un bloque de potencia de vapor sobrecalentado, en este caso es deseable minimizar la diferencia de temperaturas entre el medio de almacenamiento y el fluido de trabajo para reducir las pérdidas de energía. Para minimizar estas temperaturas el proceso y el almacenamiento debe ser isoterma, por lo que se utiliza almacenamiento de calor latente y como el proceso de precalentamiento y sobrecalentamiento son procesos de calor sensible, se beneficia cuando se combina con un sistema de almacenamiento de calor sensible.

A continuación, se llevará a cabo un estudio del estado del arte de los sistemas de almacenamiento sólido, más detenidamente en aquellos que utilizan hormigón como material de almacenamiento.

### 3 ESTADO DEL ARTE DEL ALMACENAMIENTO TÉRMICO EN SÓLIDO

Como venimos comentando, existen varios tipos de almacenamiento térmico, entre los que se encuentra el almacenamiento en sólido. En esta clase de almacenamiento el medio sólido más utilizado es el hormigón, debido a su bajo coste, alta disponibilidad y fácil procesamiento.

Un sistema de almacenamiento sólido se caracteriza, por un lado, por llevar integrado en su interior un intercambiador de calor, por el que circula el fluido HTF. Por otro lado, el medio es dual: durante el proceso de carga, el fluido, proveniente del campo de solar, atraviesa el intercambiador de calor cediendo su energía térmica al hormigón, cuando el fluido completa su recorrido, sale del almacenamiento a una menor temperatura de la que entró y vuelve al campo solar repitiendo de igual forma el proceso. Por otro lado, el proceso de descarga se realiza el mismo modo, pero en sentido inverso que la carga, pero en este caso el fluido no proviene ni se dirige al campo solar sino a la turbina de vapor o al proceso industrial que requiera dicha energía térmica (estos sistemas son también conocidos como regeneradores).

Las desventajas de este tipo de almacenamiento son: la temperatura del HTF durante la descarga disminuye conforme se va enfriando el material de almacenamiento y la transferencia de calor es baja debido a no encontrarse en contacto directo el HTF y el medio de almacenamiento, es decir, se producen ciertas pérdidas por el hecho de utilizarse un intercambiador de calor.

A partir de la idea general de la estructura y el funcionamiento de un sistema de almacenamiento en sólido, se procederá en los siguientes apartados a realizar un estudio más detallado de los diversos tipos de hormigones obtenidos hoy en día, así como de la construcción.

#### 3.1 EVOLUCIÓN DEL HORMIGÓN

En este apartado se va a mostrar los avances tecnológicos alcanzados hasta la fecha sobre la utilización del hormigón como medio de almacenamiento de energía térmica. La razón principal que mueve el interés en la investigación de este tipo de almacenamiento es debido a la combinación de su reducido coste y su buena conductividad térmica. El hormigón presenta ciertas características, tales como la facilidad de manejo y estabilidad estructural que hacen factible su uso en dicho ámbito.

El hormigón es un material que posee un alto calor específico, unas buenas propiedades térmicas (por ejemplo: alta resistencia en la compresión), un coeficiente de expansión térmica cercano al acero y una elevada resistencia mecánica para cargas de ciclos térmicos. En la tabla.3, que se muestra a continuación, se puede observar las principales características del hormigón utilizado para el almacenamiento térmico. En la tabla siguiente, tabla.4, se muestran las propiedades a una temperatura de 200°C.

Hormigón Reforzado			
Temperatura		Densidad media [kg/m <sup>3</sup> ]	Conductividad térmica media [W/ m K]
Frio [°C]	Caliente [°C]		
200	400	2200	1.5
Capacidad térmica media [kJ/kg K]	Capacidad calorífica entre volumen específico [kWh <sub>t</sub> /m <sup>3</sup> ]	Media de los costes por kg [€/kWh <sub>t</sub> ]	Media de los costes por kWh <sub>t</sub> [€/kWh <sub>t</sub> ]
0.85	100	0.04	0.89

Tabla 3 Propiedades del hormigón para el almacenamiento térmico [A. Gil et al., 2010]

Densidad a 200 °C [kg/m <sup>3</sup> ]	2700
Capacidad de calor específico a 200 °C [J/kg K]	910
Conductividad térmica a 200 °C [W/m K]	1.0
Coefficiente de expansión térmica a 200 °C [10 <sup>-6</sup> /K]	9.3
Capacidad [kWh/m <sup>3</sup> K]	0.68

Tabla 4 Propiedades térmicas del hormigón a una tem [A. Gil et al., 2010]

Cuando el hormigón es calentado, un número de reacciones y transformaciones tiene lugar influenciando en la dureza y otras propiedades físicas.

- La resistencia a la compresión disminuye un 20% a 400°C.
- El calor específico disminuye en un rango de temperatura entre 20°C y 120°C.
- La conductividad térmica disminuye en un rango de temperatura entre 20°C y 280°C.
- La resistencia del hormigón a los ciclos térmicos depende de la expansión térmica de sus componentes.

Durante años, han tenido lugar diversas investigaciones sobre las posibles combinaciones de materiales y agregados dando lugar a diferentes hormigones para mejorar así sus propiedades y solventando o minimizando los problemas mencionados anteriormente. Un ejemplo de ello es la utilización de agujas de acero como refuerzo, de esta forma se evita la rotura del hormigón, además de incrementar la conductividad térmica entorno a un 15% a 100°C y a un 10% a 250°C.

### 3.1.1 Hormigón reforzado con fibras

Numerosos estudios han reconocido que los refuerzos de fibras son un camino efectivo para mejorar la resistencia a fracturas del hormigón entre otras características. Por ejemplo, las fibras de polipropileno (PP) tienen doble efecto beneficioso, en primer lugar, mejora la resistencia a impacto, es decir, aumenta la capacidad del hormigón de absorber energía y, en segundo lugar, al fundirse entorno a los 160°C, origina unos canales en el hormigón, los cuales sirven como vía de escape a la humedad. Otras clases de fibras muy utilizadas son: el polietileno (PE), polietileno de tereftalato (PET), el alcohol polivinílico (PVA), el policloruro de vinilo (PVC), el nylon, las aramidas y los poliésteres

A continuación, estudiaremos los efectos de algunas de las fibras mencionadas anteriormente en las propiedades térmicas y mecánicas del hormigón.

- Refuerzo con fibras de nylon

Para ver el efecto que tienen las fibras en las propiedades físicas y mecánicas del hormigón se partirá de dos clases de materiales. Por un lado, tendremos un hormigón de mezcla tradicional (C) y un cemento Portland tradicional reforzado con 0.5% v/v (aproximadamente unos 5kg/m<sup>3</sup>) de fibras de nylon PA66 reciclado (FC). En la tabla.5 se detalla la composición de las dos clases de hormigón.

Componente	C	FC
Agua [kg/m <sup>3</sup> ]	97	97
Cemento [kg/m <sup>3</sup> ]	280	280
Gravilla [kg/m <sup>3</sup> ]	400	400
Gravilla fina [kg/m <sup>3</sup> ]	200	200
Arena [kg/m <sup>3</sup> ]	1000	995
Fibras [kg/m <sup>3</sup> ]	-	5
Ratio agua/cemento [kg/m <sup>3</sup> ]	0.35	0.35
Peso específico	2451	2440

Tabla 5 Composición de los cementos del estudio [Ozger, 2013]

A continuación, se realiza una comparación detallada sobre las propiedades, térmicas y mecánicas, más importantes del hormigón para su uso en el almacenamiento térmico.

**Baja humedad.** El hormigón reforzado con fibras posee menor humedad que un cemento no reforzado debido a que parte de la humedad contenida en el cemento es absorbida por la propia fibra. Poseer una menor humedad siempre es algo beneficioso a la hora del almacenamiento térmico.

**Capacidad y conductividad térmica.** El hormigón reforzado con fibras posee mayor conductividad térmica tanto a baja como a alta temperatura. Por el contrario, tiene una menor capacidad térmica debido a que a partir de 300°C, las fibras se funden y parte del calor es absorbido por las fibras en vez de por la matriz. En la tabla.6 se muestra ambos valores para las dos muestras de estudio.

	Conductividad térmica [W/m K] a 25 °C	Conductividad térmica [W/m K] a 300 °C	Capacidad térmica [J/g K] a 300°C
FC	1.30 ± 0.02	1.16 ± 0.02	0.63
C	1.12 ± 0.02	1.02 ± 0.02	0.81

Tabla 6 Capacidad térmica de ambas muestras a diferentes temperaturas [Ozger, 2013]

**Densidad.** Su variación con la temperatura depende del coeficiente de expansión térmica, el cual es importante en el diseño termomecánico del almacenamiento. El coeficiente de expansión térmica del material de almacenamiento debe ser parecido al material del intercambiador de calor integrado. La muestra FC tiene un coeficiente de expansión térmica ( $17.2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) parecido al del acero ( $17.5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ).

**Pérdida de masa.** La pérdida de masa aumenta con el tiempo y el valor de la misma respecto a nuestras muestras de cemento varía en función de la temperatura aplicada y de la permeabilidad de los materiales. Para una temperatura de 150°C o menor, la pérdida de masa es mayor en la muestra C que en la FC debido a que para dichas temperaturas sólo el agua es liberada del material. Por el contrario, cuando trabajamos con temperaturas mayores, la pérdida de masa de la muestra FC es mayor por dos razones, por la liberación del agua y por la fundición de las fibras.

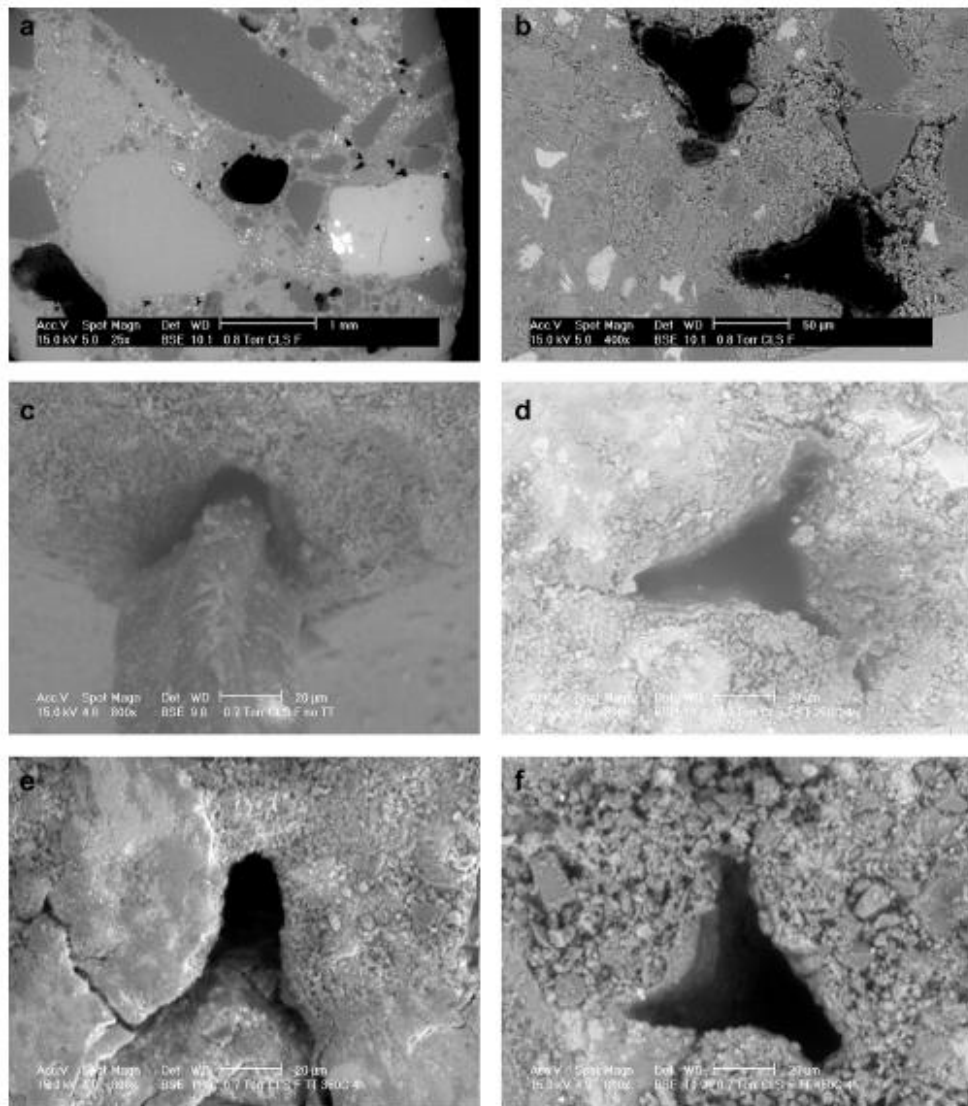
**Resistencia mecánica.** El FC tiene una mayor resistencia a compresión, pero una menor resistencia a tracción debido a la menor adhesión entre fibras y matriz. En la tabla.7 se muestran los valores obtenidos tras el ensayo realizado sobre ambas muestras de hormigón, con forma cilíndrica.

	FC	C
Fuerza a compresión [MPa]	$39 \pm 0.2$	$38 \pm 0.1$
Módulo elástico [MPa]	$36 \pm 0.2$	$37 \pm 0.1$
Fuerza a tracción [MPa]	$3.9 \pm 0.2$	$4.4 \pm 0.04$

*Tabla 7 Características mecánicas tras un ensayo [Ozger, 2013]*

A continuación, ilustración.15, se muestra unas series de imágenes de la microestructura del hormigón reforzado y cómo evolucionan al aumentar la temperatura. En las dos primeras imágenes (*a* y *b*) se puede apreciar de forma clara las fibras dentro de la matriz de hormigón. Las imágenes siguientes (de *d-f*) son imágenes de la misma estructura, pero a 250°C, 350°C y 450°C respectivamente, donde se aprecia la aparición de grietas alrededor de las fibras y estas se atenúan cuando alcanzamos temperaturas de 350°C, a partir de la cual empiezan las fibras a fundirse dejando unos huecos en su lugar (imágenes *e* y *f*).

Podemos concluir a la vista de las propiedades térmicas y mecánicas que el hormigón Portland reforzado con fibras de nylon reciclado y agregados de dolomita como material puro es un material ideal para su utilización como medio de almacenamiento sólido.

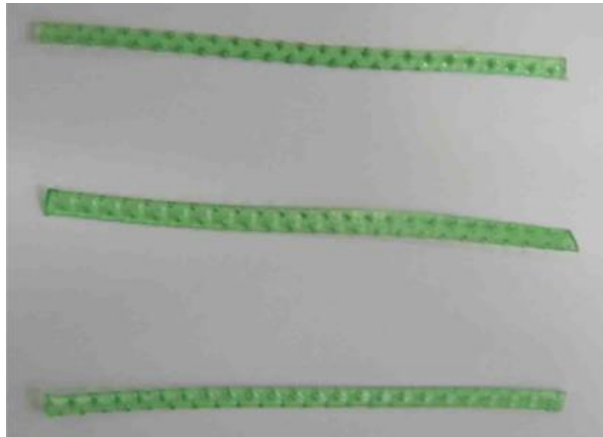


*Ilustración 15 Microestructura de una muestra de hormigón reforzado con fibras de nylon después de 28 días de curación (a – c), y después de un tratamiento térmico a 250°C (d), 350°C (e) y 450°C (f). [Ozger, 2013]*

- Refuerzo de fibras de PET reciclado

El PET es uno de los plásticos más utilizados en el mundo. Su producción excede los 6.7 millones de ton/año. La eliminación de los PET causa los mayores problemas medioambientales de su grupo, por lo que para disminuir dichos problemas se le busca diversos usos como material reciclado. En nuestro caso, el PET será reciclado como fibra, ilustración. 16, para reforzar al hormigón.





*Ilustración 16 Fibras de PET reciclado [Bae, 2010]*

La función de las fibras de PET reciclado como refuerzos en el hormigón es mejorar el control de la grieta y aumentar la ductilidad.

Un estudio realizado por Sung Bae Kim et al. [Sung, 2010], de una muestra de cemento reforzado con fibras de PET reciclado (RPET), se ha obtenido las siguientes propiedades mejoradas.

**Resistencia a la compresión y módulo elástico.** Ambas decrecen con el aumento de la cantidad de fibras de PET reciclado en el hormigón.

**Resistencia a la propagación de una grieta.** La capacidad de resistencia a la propagación de una grieta es mayor en los hormigones reforzados con fibras de PET reciclado que en los hormigones sin reforzar.

**Ductilidad y tensión de rotura.** Aumenta la ductilidad y la tensión de rotura en los hormigones reforzados con fibras PET de los hormigones no reforzados a un máximo de un 1000% y 30% respectivamente dependiendo de la cantidad de fibra agregada.

### **3.1.2 Hormigón con agregados geopolímeros**

Los geopolímeros pueden ser producidos por la combinación de puzolanas o materiales aluminio-silicatos (por ejemplo, cenizas volantes (FA) [S. Andini, 2008]) con una solución de alta alcalinidad.

La utilización de agregados geopolímeros en el hormigón tiene doble función. Por un lado, los geopolímeros tienen unas características parecidas a las cerámicas, por lo que al agregar geopolímeros mejoramos las propiedades térmicas del hormigón y, por otro lado, disminuimos la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> en un 80% en la fabricación del hormigón, mejorando el impacto medio ambiental.

A continuación, se va a describir las propiedades térmicas y mecánicas de dos mezclas de hormigones con diferentes agregados geopolímeros. Estas propiedades han sido obtenidas gracias al estudio de Daniel et al. [Daniel, 2008]. La composición de ambas mezclas queda detallada en la tabla.8.

Clase de Agregado	% de Agregado en la muestra	Agregado grueso [kg/m <sup>3</sup> ]	Agregado fino [kg/m <sup>3</sup> ]	FA [kg/m <sup>3</sup> ]	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	KOH [kg/m <sup>3</sup> ]	Régimen de curación	
							T [°C]	T [h]
Basalto	77	1125	750	420	100	40	80	24
Escorias	77	1125	750	420	100	40	80	24

Tabla 8 Composición de las distintas mezclas de hormigón [Daniel, 2008]

- **Resistencia a la compresión en función del ratio Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/ KOH.** La resistencia a la compresión mejora al aumentar el ratio de Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/ KOH con y sin tratamiento térmico, pero el aumento es más significativo cuando la temperatura aumenta debido al bajo coeficiente de difusión del K<sup>+</sup>.
- **Resistencia a la compresión en función del agregado.** La utilización de basalto y escorias como agregado geopolímero incrementa la dureza de un 59.0 MPa a un 70.5 MPa y a un 61.8 MPa respectivamente. Como podemos observar el basalto es un mejor geopolímero que las escorias. Ambos agregados se ven afectados de forma negativa con el aumento de la temperatura. La resistencia a la compresión decrece un 58% y un 65% para el compuesto con agregados de basalto y el compuesto con agregado de escorias respectivamente.

### 3.1.3 Hormigón de aluminio con agregados de grafito

La utilización de un hormigón de aluminio, cuya composición química se muestra en la tabla.9, mejora la resistencia a la corrosión. Con la adición de grafito se consigue una mejor conductividad térmica.

Materiales	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O
% p/p	38.79	7.17	51.68	2.07	0.29

Tabla 9 Composición del hormigón de aluminio [Yuan, 2012]

La variación de las propiedades térmicas y mecánicas de los cementos de aluminio con agregados de grafito que a continuación se detallan, han sido tomadas tras ensayos realizados en la literatura [Yuan, 2012].

**Conductividad térmica.** La conductividad térmica aumenta al aumentar la concentración de grafito en la mezcla del hormigón. Este aumento es más acusado cuando no se le aplica a la mezcla ningún tratamiento térmico. Un ejemplo de la evolución de la conductividad térmica conforme aumenta la cantidad de grafito queda reflejada en la tabla.10.

Contenido de grafito (%)	Antes del tratamiento térmico [W/m K]	Después del tratamiento térmico [W/m K]
0	0.741	0.405
1	0.830	0.501
5	1.083	0.587
10	1.967	0.746
15	2.197	0.767

Tabla 10 Evolución de la conductividad térmica de la mezcla antes y después del tratamiento térmico (350 °C durante 6h). La mezcla tiene un ratio agua/cemento del 0.3. [Yuan, 2012]

**Capacidad térmica volumétrica.** Del mismo modo que ocurre con la conductividad térmica, la capacidad térmica volumétrica de la mezcla aumenta al hacerlo la cantidad de grafito contenido en ella. Este aumento es más acusado en mezclas que no han sufrido ningún tratamiento térmico. En la tabla.11 se representa el aumento de la capacidad térmica volumétrica al aumentar la cantidad de grafito en la mezcla antes y después de un tratamiento térmico. En la tabla.10 se

aprecia como con una cantidad superior al 1% de grafito la capacidad térmica volumétrica de la mezcla mejora respecto a un hormigón que no contenga agregados de grafito.

Contenido de grafito (%)	Antes del tratamiento térmico [W/m <sup>3</sup> K]	Después del tratamiento térmico [W/m <sup>3</sup> K]
0	1785	1284
1	1704	1611
5	2598	1848
10	4801	2585

Tabla 11 Evolución de la capacidad térmica volumétrica de la mezcla antes y después del tratamiento térmico (350 °C durante 6h). La mezcla tiene un ratio agua/cemento del 0.3. [Yuan, 2012]

**Coefficiente de expansión térmica.** Para la explicación de esta propiedad nos apoyaremos en la ilustración.17, en la cual viene representada la variación del coeficiente de expansión térmica con la temperatura de hormigones con diferentes porcentajes de agregados de grafito antes y después del tratamiento térmico. Observamos que las mezclas antes del tratamiento térmico tienen mayores fluctuaciones entre los 150 °C y 350 °C debido a la evaporación del agua. Estas fluctuaciones son menos acusadas con forme aumenta la cantidad de grafito en la mezcla. Por otra parte, observamos que las mezclas, después del tratamiento térmico, mantienen su coeficiente de expansión térmica constante con la temperatura. Por lo que, a la vista de la ilustración.17, podemos concluir diciendo que para su uso como material de almacenamiento de energía térmica es conveniente aplicarle previamente un tratamiento térmico.

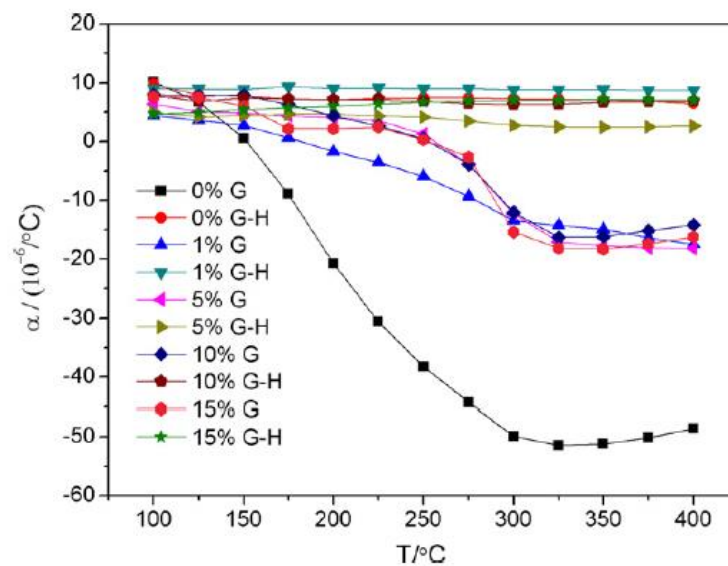


Ilustración 17 Variación del coeficiente de expansión térmica con la temperatura de hormigones con diferentes cantidades de grafito [Yuan, 2012]

**Resistencia mecánica.** El contenido de grafito en la mezcla afecta positivamente hasta alcanzar el 1%, a partir de dicho valor la resistencia mecánica decrece de manera significativa con la adición de grafito. Esta tendencia es similar con y sin tratamiento térmico. En el caso de realizar tratamiento térmico los valores de resistencia mecánica que se pueden obtener son menores que si no se realiza tratamiento. Una visión gráfica de esta tendencia se encuentra en la ilustración. 18.

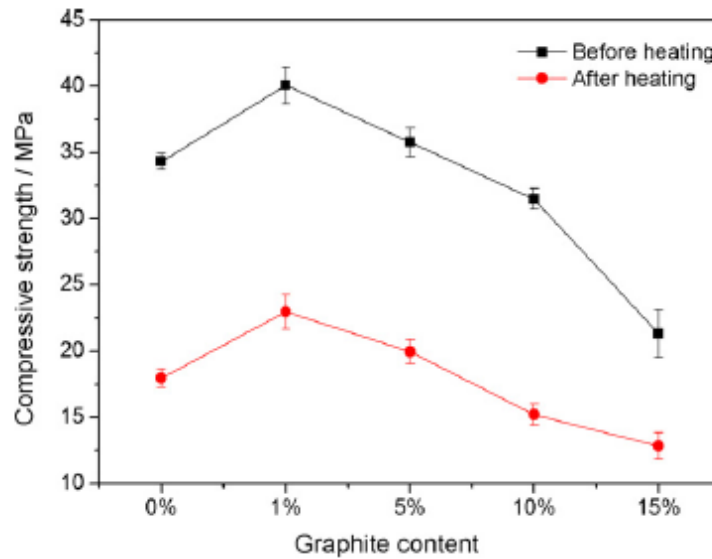


Ilustración 18 Resistencia mecánica según el porcentaje de grafito [Yuan, 2012]

A la vista de las propiedades térmicas y mecánicas desarrolladas podemos concluir que la adición de grafito al hormigón mejora de manera significativa tanto la conductividad térmica como la capacidad térmica. Una cantidad adecuada de grafito en la mezcla estaría entorno al 1% y el 5%, ya que con valores cercanos al 1% obtenemos la máxima resistencia mecánica posible con grafito, mientras que con valores cercanos al 5% obtenemos excelentes propiedades térmicas.

### 3.1.4 Hormigón denominado “Heatcrete®”

La mezcla de hormigón más actual para su uso como material de almacenamiento térmico ha sido descubierta y probada por la empresa EnergyNest en colaboración con Heigelberg Cement ubicada en Alemania. La nueva mezcla de hormigón es conocida como “Heatcrete®”. Poco se sabe de la constitución de la mezcla, pero podemos decir que tiene agregados de cuarcita. La composición de este hormigón le proporciona las mejores propiedades térmicas posibles.

El “Heatcrete®” es un material muy versátil tanto en lo que se refiere a la temperatura de trabajo (50°C a 550°C) como a su construcción.

El “Heatcrete®” a una temperatura de 400°C posee las características mostradas en la tabla.12 mostrada a continuación. A partir de estas características podemos observar cómo requerimos un menor volumen que otras mezclas de hormigones para una misma cantidad de energía almacenada.

Propiedades	340°C
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	2364
Capacidad calorífica específicas [kWh/m <sup>3</sup> K]	0.75
Conductividad térmica [W/m K]	2.2
Iniciación de la grieta	No hay grietas visibles

Tabla 12 Propiedades Heatcrete® A 400 °C [Matthieu, 2015]

Además, se le han aplicado test térmicos en la DNV-GL laboratory para comprobar su resistencia térmica y no se han apreciado roturas térmicas. La ilustración.19, muestra parte del almacenamiento después de la realización del test.



Ilustración 19 Módulo de almacenamiento NEST después del test térmico [Bergan, 2014].

Sin embargo, si se han observamos una ligera reducción de masa de un 2% durante los ciclos térmicos a 400°C. En la ilustración.20, observamos una gráfica de dicha reducción de masa durante el ensayo. En ella vemos que la máxima reducción de masa se produce en los primeros 40 minutos del primer ciclo de carga/descarga, siendo menor la pérdida de masa conforme se suceden los siguientes ciclos.

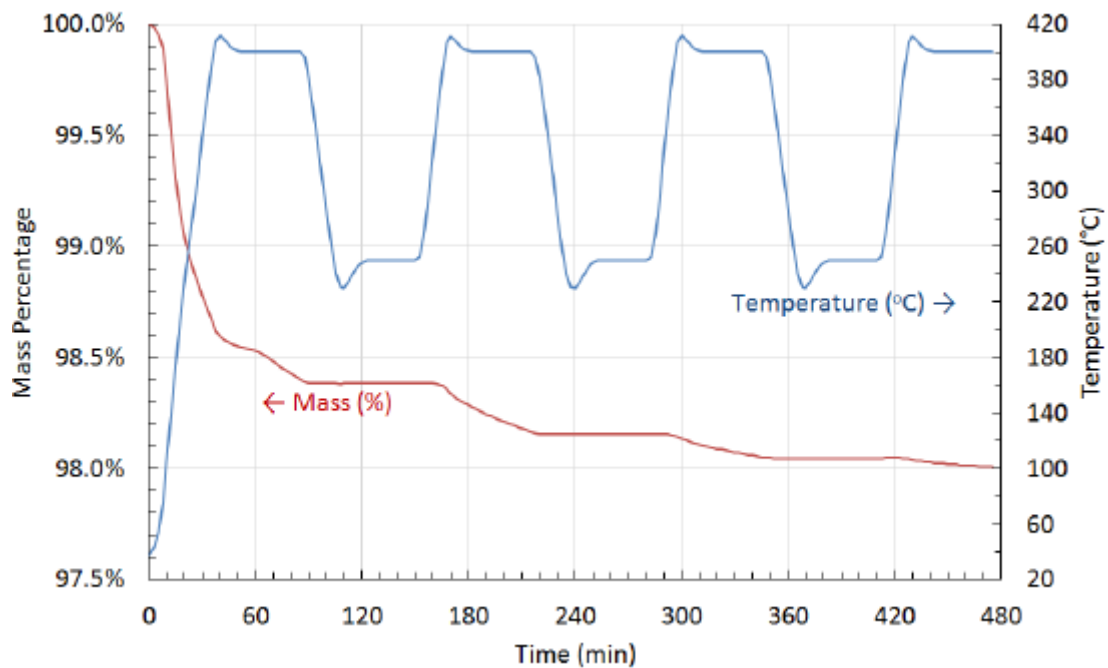


Ilustración 20 Reducción de masa en el Heatcrete® durante un ensayo térmico [Matthieu, 2015].

En definitiva, esta pérdida de masa es insignificante y el Heatcrete® se puede considerar estable a 400°C. Además, de ser considerado térmicamente y mecánicamente superior a otras mezclas expuestas anteriormente.

En capítulos posteriores se desarrollará tanto la constitución del módulo de almacenamiento como la descripción de una planta piloto con el sistema de almacenamiento NEST.

### 3.2 ESTUDIO COMPARATIVO DE DIFERENTES HORMIGONES

Para concluir con la búsqueda de la mejor mezcla posible de hormigón para su uso como almacenamiento térmico procederemos a realizar dos estudios comparativos de diferentes mezclas aportados por la literatura, [Panneer, 2012] y [Ferone, 2014].

#### 3.2.1 Estudio del hormigón a alta temperatura

Este estudio realizado por el Dr. R. Panneer Selvam et al. En la universidad de Arkansas muestra diferentes mezclas de hormigones y su respectivo comportamiento a altas temperaturas.

En primer lugar, se realizó una prueba térmica a 6 mezclas distintas de hormigones, dichas mezclas son mostradas en la tabla.13 siguiente.

Materiales [lb/yd <sup>3</sup> ]	Mezclas					
	1	2	3	4	5	6
Cemento	900	2000	1004	1004	1500	1125
Polvo de sílice	0	0	112	0	500	375
Agregado grueso	1700	0	1420	1420	0	0
Agregado fino	1211	1500	1350	1350	1435	1780
Agua	270	220	228	228	406	450
Agua/cemento	0.3	0.15	0.22	0.22	0.2	0.3
Fibras de acero	0	264	0	0	0	0
Fibras de polipropileno	0	0	0	3.375	3.375	3.375

Tabla 13 Composición de las mezclas [Panneer, 2012]

Como resultado se ésta prueba térmica tenemos, por un lado, que las tres primeras mezclas explotaron debido a la inexistencia de vías de escape para el vapor de agua, por lo que la presión del vapor aumentó y provocó la explosión. Por otro lado, las tres últimas mezclas al contener fibras de polipropileno estas se derritieron dejando canales de salida al vapor de agua, por lo que superaron la prueba con éxito.

A la vista de los resultados de la prueba térmica se procedió a la mejora, tanto de dichas mezclas, mostrándose la nueva composición en la tabla.14, y a continuación se le realizó la prueba de resistencia mecánica.

La prueba mecánica consistía en realizar 10 ciclos térmicos para comprobar su resistencia estructural.

Materiales [lb/yd <sup>3</sup> ]	Mezclas						
	1	2	3	4	5	6	7
Cemento	704	704	528	528	457	457	457
Polvo de sílice	-	-	-	-	71	71	71
Cenizas volantes	-	-	71	71	71	71	71
Arena	559	559	495	495	470	470	464
Agua (l)	108	108	108	108	108	108	108
HR WR (l)	3.7	2.7	2.7	3.8	5.5	5.5	5.9
Fibras de acero	36	36	36	36	36	36	53
Fibras de polipropileno	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2

Tabla 14 Composición de las mezclas para la prueba mecánica [Panneer, 2012]

Tras la prueba mecánica se observó que las mezclas 1 y 2 fueron las que mejor soportaron la prueba mientras que el resto al tercer ciclo convergieron a su capacidad residual. En la ilustración.21 se muestra la evolución de cada una de las mezclas durante la prueba mecánica.

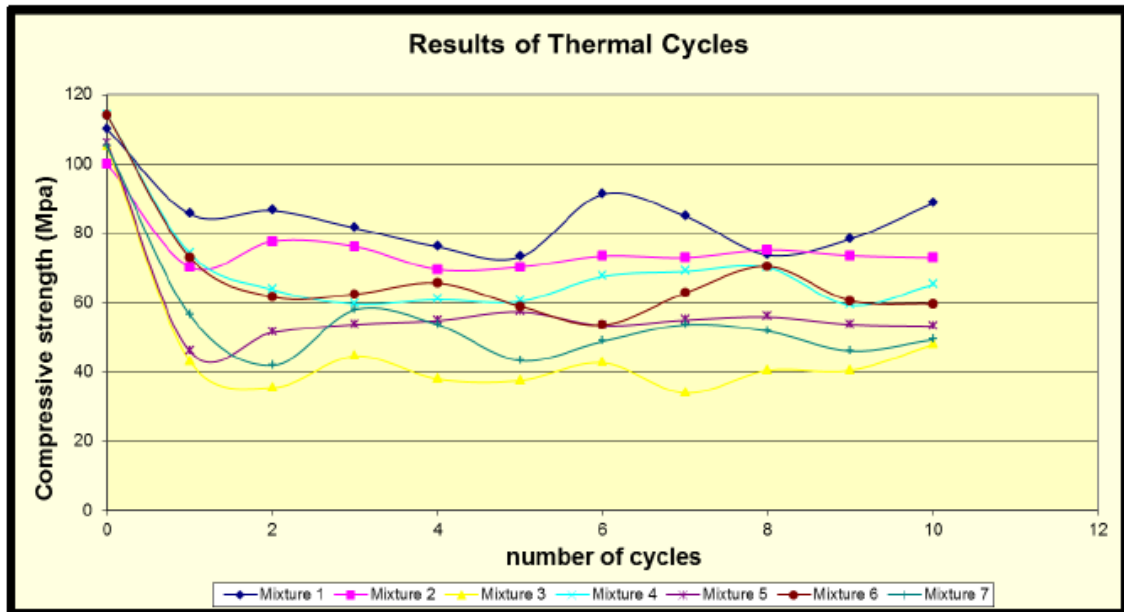


Ilustración 21 Resultados de la prueba mecánica [Panneer, 2012]

### 3.2.2 Estudio comparativo de diferentes mezclas

A continuación, se realiza un estudio comparativo de 5 mezclas de hormigones obtenidos de la literatura y desarrollados en secciones anteriores.

En primer lugar, se pasa a detallar resumidamente las 5 mezclas de hormigones que vamos a comparar, observando sus propiedades en la tabla.15 mostrada a continuación.

- Mezcla PC (Hormigón básico) – Compuesto por grava, arena caliza y cemento Portland.
- Mezcla FC – Mezcla PC con agregados de 0.5% (v/v) de fibra sintética reciclada.
- Mezcla HT (Hormigón de alta temperatura) – Compuesto por un cemento de alto horno como aglutinante y agregados de óxido de hierro, además de cenizas volantes como material auxiliar.
- Mezcla CC (Cerámica moldeable) – Compuesto por un aglutinante que contiene  $Al_2O_3$  puro, óxido de hierro y agentes acelerantes para reducir la viscosidad.
- Mezcla A4 – Contiene principalmente agregados de basalto y bauxita, fibras de acero, micropolvo de aluminio, y 5% de grafito para aumentar la conductividad térmica.

Para el cálculo de la difusión térmica ( $\alpha_{sol}$ ) y de la capacidad calorífica volumétrica ( $C_{vol}$ ) se han utilizado las siguientes expresiones

$$\alpha_{sol} = k_{sol} / (\rho_{sol} \cdot c_{sol})$$

$$C_{vol} = \rho_{sol} \cdot c_{sol}$$

Ambos valores representan el transporte de calor y el comportamiento capacitivo de cada mezcla de hormigón respectivamente.

Material	Densidad, $\rho_{sol}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Capacidad calorífica específica, $c_{sol}$ [J/kg·K]	Conductividad térmica, $k_{sol}$ [W/m·K]	Difusión térmica, $\alpha_{sol} \cdot 10^7$ [m <sup>2</sup> /s]	Capacidad calorífica volumétrica, $C_{vol}$ [kWh/m <sup>3</sup> ·K]
PC	2451	810	1.02	5.14	0.551
HT	2750	916	1.00	3.97	0.700
CC	3500	866	1.35	4.45	0.842
A4	2680	950	2.43	9.54	0.707
FC	2440	630	1.16	7.55	0.427

Tabla 15 Propiedades térmicas de las mezclas de estudio [Ferone,2014]

Para tener una representación más gráfica de las propiedades térmicas de las mezclas, se muestra en la ilustración.22. En dicha ilustración.22 obtenemos los valores de la conductividad térmica (área rectangular formada por los valores de cada mezcla) de cada mezcla

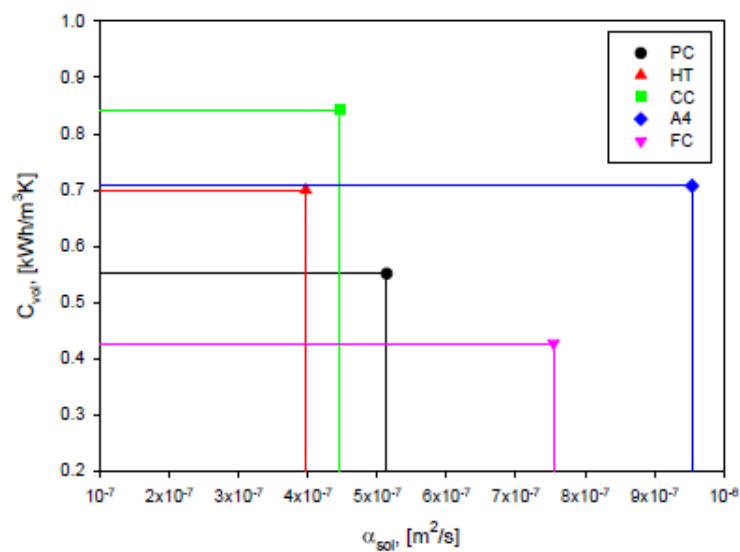


Ilustración 22 Representación gráfica de las propiedades térmicas de las diferentes mezclas [Ferone, 2014]

Una vez definida la composición y las propiedades térmicas de las distintas mezclas se procede a realizar el estudio térmico del ciclo de trabajo según dos criterios, el de volumen constante y el de calor nominal constante.

### Criterio a volumen constante

El ciclo de almacenamiento térmico para cada mezcla de estudio se muestra en la ilustración.23. En ella observamos, por un lado, que las mezclas A4 y FC alcanzan las temperaturas más altas, cerca de los 663 K, aunque se enfrían rápidamente durante la descarga, y, por otro lado, al comienzo de la fase de descarga las mezclas PC, HT y CC muestran un pequeño aumento de la temperatura transitoria.



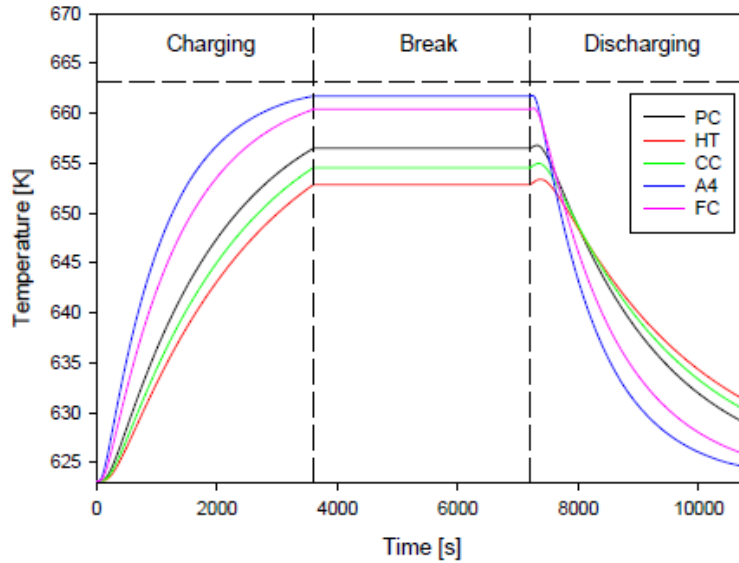


Ilustración 23 Ciclo térmico de las diferentes mezclas a  $V_{tot}$  constante [Ferone, 2014]

A mayor difusión térmica, mejor es el perfil térmico y mayor es la temperatura que es capaz de alcanzar.

En la ilustración.24, que se muestra a continuación observamos los mapas de temperatura de contorno durante la fase de carga (derecha) y descarga (izquierda). Después de 60 min, las mezclas HT, PC y CC muestran varias zonas con una distribución de temperatura no uniforme debido a una lenta respuesta a un cambio rápido de temperatura del HTF, dichas zonas explican la zona de temperatura transitoria observada en la ilustración.23. Respecto a la fase de descarga observamos que para las mezclas FC y A4 son prácticamente reversibles.

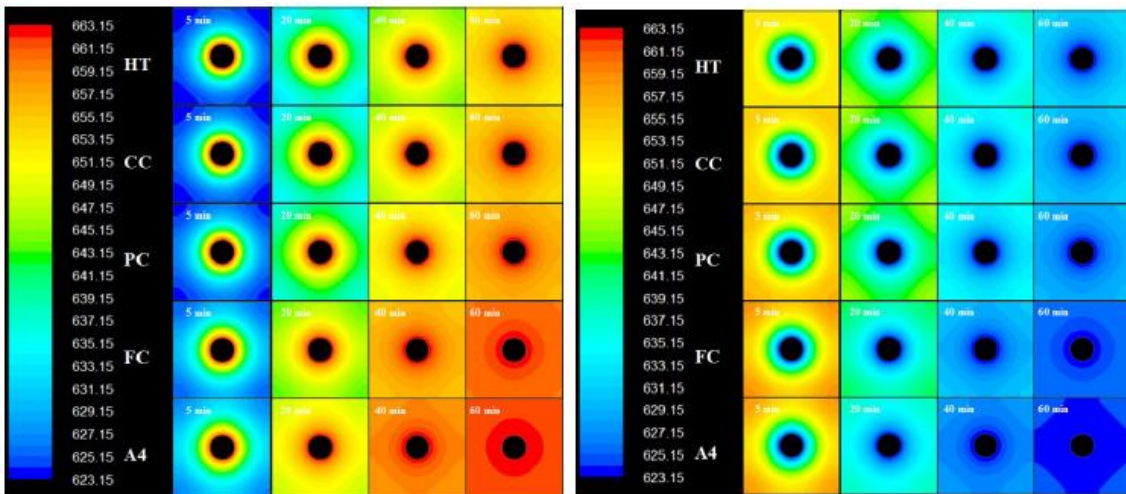


Ilustración 24 Mapas de temperatura de contorno de las diferentes mezclas  $V_{tot}$  constante durante la fase de carga (derecha) y la fase de descarga (izquierda) [Ferone, 2014]

En la tabla.16 se resume los resultados obtenidos de la simulación durante los ciclos térmicos. En dicha tabla observamos el valor de la diferencia de temperatura media efectiva experimentada por el almacenamiento ( $\Delta T_{ef}$ ) utilizado para calcular el calor efectivo ( $Q_{ef}$ ) a partir de la siguiente expresión.

$$Q_{ef} = \rho_{sol} \cdot V_{sol} \cdot c_{sol} \cdot \Delta T_{ef}$$

Material	$m_{sol}$ [kg]	$\Delta T_{ef}$ [K]	$V_{tot} \cdot 10^3$ [m <sup>3</sup> ]	$Q_{ef}$ [kWh <sub>th</sub> ]	$Q_{nom}$ [kWh <sub>th</sub> ]	$\eta_{alm}$ [%]	Densidad de potencia volumétrica [kWh <sub>th</sub> /m <sup>3</sup> ]	Densidad de potencia [kWh <sub>th</sub> /ton]
PC	14.92	33.32	6.40	0.112	0.134	83.58	17.50	7.51
HT	16.74	29.69	6.40	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

Tabla 16 Propiedades de las mezclas durante la simulación  $V_{tot}$  constante [Ferone, 2014]

Cómo observamos en la tabla.16 la mezcla CC es la que posee un mayor peso debido a que es el que tiene una mayor densidad para un cierto volumen constante. Respecto a la mezcla FC observamos que posee los valores más bajos de  $Q_{ef}$  y  $Q_{nom}$  debido al reducido valor de  $c_{sol}$ . También vemos que el rendimiento aumenta al hacerlo la difusión térmica.

### Criterio a calor constante

El ciclo de almacenamiento térmico para cada mezcla de estudio se muestra en la ilustración.25. En ella observamos, por un lado, que durante la fase de descarga las mezclas PC, HT y FC muestran un leve incremento de temperatura al principio de la fase de descarga. Este hecho es debido de que tienen una respuesta lenta a un cambio rápido en la temperatura del HTF. Por otro lado, la mezcla que alcanza la mayor temperatura vuelve a ser A4 y la mezcla CC muestra unos resultados mejores.

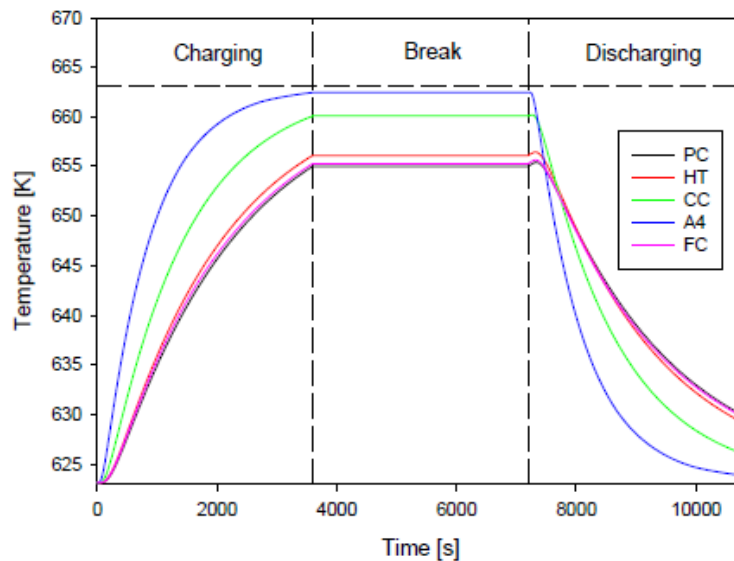


Ilustración 25 Ciclo térmico de las diferentes mezclas a  $Q_{nom}$  constante [Ferone, 2014]

En la ilustración.26, que se muestra a continuación observamos los mapas de temperatura de contorno durante la fase de carga (derecha) y descarga (izquierda). Después de 60 min, las mezclas HT, PC y FC muestran varias zonas con una distribución de temperatura no uniforme. Respecto a la fase de descarga observamos que para las mezclas CC y A4 son prácticamente reversibles.

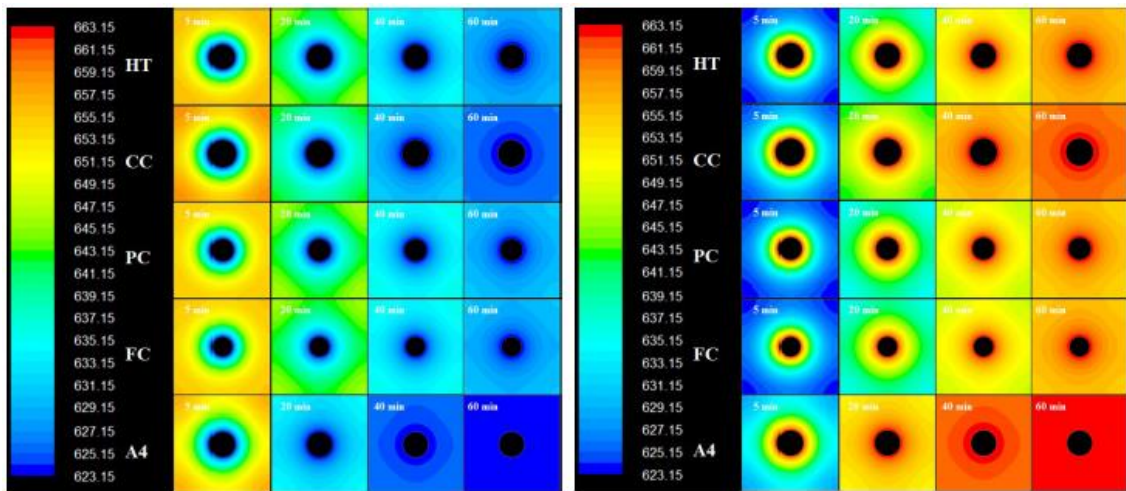


Ilustración 26 Mapas de temperatura de contorno de las diferentes mezclas a  $Q_{nom}$  constante durante la fase de carga (derecha) y la fase de descarga (izquierda) [Ferone, 2014]

En la tabla.17 se resume los resultados obtenidos de la simulación durante los ciclos térmicos.

Material	$m_{sol}$ [kg]	$\Delta T_{ef}$ [K]	$V_{tot} \cdot 10^3$ [m <sup>3</sup> ]	$Q_{ef}$ [kWh <sub>th</sub> ]	$Q_{nom}$ [kWh <sub>th</sub> ]	$\eta_{alm}$ [%]	Densidad de potencia volumétrica [kWh <sub>th</sub> /m <sup>3</sup> ]	Densidad de potencia [kWh <sub>th</sub> /ton]
PC	16.11	31.87	6.88	0.116	0.146	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

Tabla 17 Propiedades de las mezclas durante la simulación  $Q_{nom}$  constante [Ferone, 2014]

En esta tabla podemos observar que la mezcla FC contiene el mayor peso y  $V_{tot}$  debido a su baja densidad y capacidad calorífica específica. Por otro lado, la mezcla A4 no tiene un valor de capacidad calorífica elevada, pero si una  $\Delta T_{ef}$  elevada lo que produce una alta conductividad térmica.

### 3.2.3 Estudio comparativo entre hormigones ligeros

Este estudio consiste en la comparación de las propiedades térmicas de 5 mezclas de hormigones. Por un lado 4 mezclas de hormigones con diferentes porcentajes de agregados plásticos y, por otro lado, una mezcla de hormigón geopolímero. En la tabla.18, se muestra la composición de cada una de las mezclas. En todas ellas se ha utilizado un superplastificante para mejorar la trabajabilidad de la mezcla. La cantidad de superplastificante aumenta conforme lo hace la cantidad de agregados plásticos.

Respecto a la anotación de las mezclas decir que PA hace referencia a los hormigones convencionales y G al hormigón geopolímero, mientras que el subíndice se refiere al porcentaje de agregado plástico que contiene la mezcla (0% a 30%).

Material	PA <sub>0</sub>	PA <sub>10</sub>	PA <sub>20</sub>	PA <sub>30</sub>	G
Cemento Portland [kg/m <sup>3</sup> ]	300	300	300	300	-
Mármol [kg/m <sup>3</sup> ]	146	152	171	183	-
Caliza triturada [kg/m <sup>3</sup> ]	1648	1351	1227	1101	854
Agregados plásticos [kg/m <sup>3</sup> ]	0	70	140	210	-
Cenizas volantes [kg/m <sup>3</sup> ]	90	90	90	90	208
Solución alcalina [kg/m <sup>3</sup> ]	-	-	-	-	138
Superplastificante [L/m <sup>3</sup> ]	6.86	7.26	8.91	9.95	-
Ratio agua/cemento	0.5	0.5	0.5	0.5	-

Tabla 18 Composición de las mezclas de estudio [Ferone, 2014]

Como es de suponer la cantidad de agregados de plástico influye en las propiedades térmicas. En la tabla.19 podemos ver cómo un aumento de la cantidad de agregados produce, por un lado, una disminución en la conductividad térmica y en la densidad del material y, por otro lado, un aumento en la capacidad de calor específico. Respecto al hormigón geopolímero observamos que tiene una elevada capacidad térmica y conductividad térmica, pero una menor densidad.

Mezcla	Conductividad térmica, $k_{sol}$ [W/m·K]	Densidad, $\rho_{sol}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Capacidad de calor específico, $c_{sol}$ [J/kg·K]
PA <sub>0</sub>	1.42	2094	722
PA <sub>10</sub>	1.18	1914	743
PA <sub>20</sub>	0.94	1762	766
PA <sub>30</sub>	0.71	1518	789
G	1.01	1811	751

Tabla 19 Propiedades térmicas de los hormigones ligeros [Ferone, 2014]

A continuación, se muestra en la ilustración.27 una comparación gráfica de las propiedades térmicas en función de la capacidad calorífica volumétrica,  $C_{vol}$ , y la difusión térmica,  $\alpha_{sol}$ .

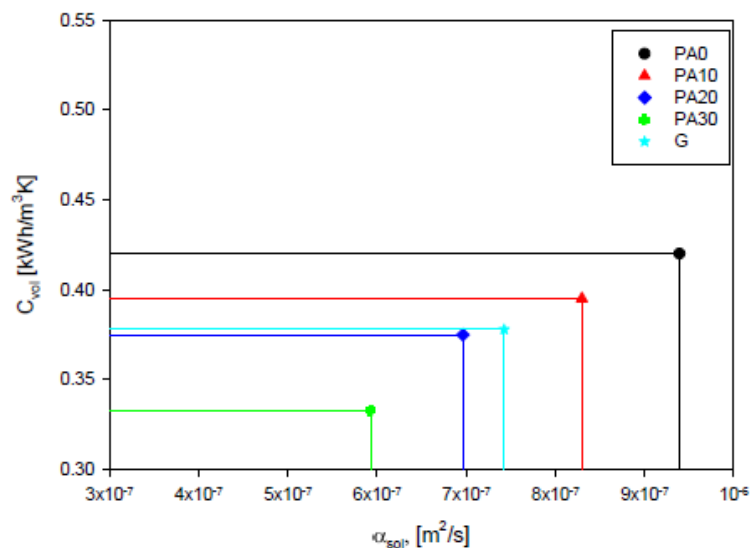


Ilustración 27 Representación gráfica de las propiedades térmicas de los hormigones ligeros y geopolímero [Ferone, 2014]

Por último, se realizará un estudio térmico a partir del criterio de  $V_{tot}$  constante. En la ilustración.28 se muestra el ciclo térmico para cada una de las mezclas. En ella comprobamos que los perfiles de temperatura no son tan diferentes debido a que las mezclas poseen prácticamente las mismas propiedades térmicas. Otro aspecto interesante que observar es el inicio de la fase de

descarga, el cual vemos que la respuesta del material es rápida frente a un cambio de temperatura del HTF, por lo que tenemos un periodo transitorio muy pequeño.

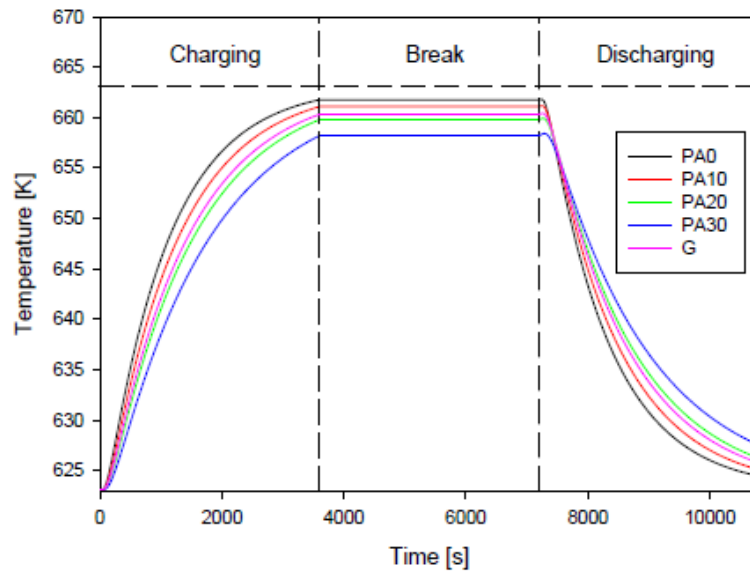


Ilustración 28 Ciclo térmico de las mezclas ligeras y geopolímera [Ferone, 2014]

Seguidamente se muestra en la ilustración.29 los mapas de temperatura de contorno durante la fase de carga (derecha) y la fase de descarga (izquierda). En ellas observamos que la mezcla G posee un perfil de temperatura intermedia entre las mezclas PA<sub>10</sub> y PA<sub>20</sub> debido a que sus propiedades son parecidas. Respecto a la fase de descarga observamos que prácticamente todas las mezclas son reversibles.

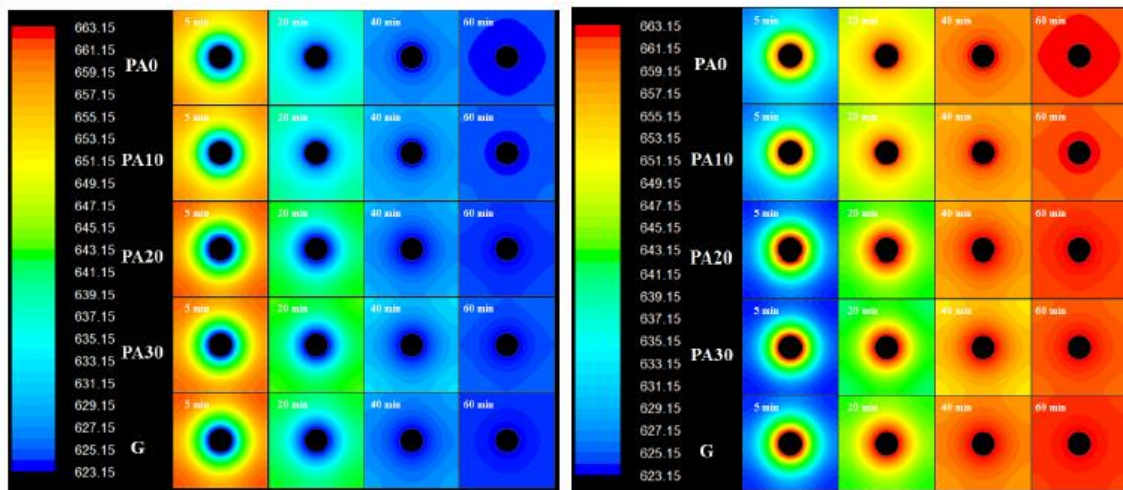


Ilustración 29 Mapas de temperatura de contorno durante la fase de carga (derecha) y fase de descarga (izquierda) para las mezclas ligeras y geopolímeros [Ferone, 2014]

Para finalizar con este estudio se muestra en la tabla.20 los valores obtenidos tras el estudio. En ella observamos que  $\Delta T_{ef}$  disminuye conforme aumenta la cantidad de agregados plásticos y, como consecuencia, el rendimiento disminuye.

Material	$m_{sol}$ [kg]	$\Delta T_{ef}$ [K]	$V_{tot} \cdot 10^3$ [m <sup>3</sup> ]	$Q_{ef}$ [kWh <sub>th</sub> ]	$Q_{nom}$ [kWh <sub>th</sub> ]	$\eta_{alm}$ [%]	Densidad de potencia volumétrica [kWh <sub>th</sub> /m <sup>3</sup> ]	Densidad de potencia [kWh <sub>th</sub> /ton]
PA <sub>0</sub>	12.74	38.49	6.40	0.098	0.102	95.86	15.31	7.69
PA <sub>10</sub>	11.65	37.87	6.40	0.091	0.096	94.63	14.22	7.81
PA <sub>20</sub>	10.72	36.58	6.40	0.083	0.091	90.94	12.97	7.74
PA <sub>30</sub>	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

Tabla 20 Valores obtenidos del estudio térmico para las mezclas ligeras y geopolímero [Ferone, 2014]

### 3.2.4 Conclusiones de los estudios

En primer lugar, la primera diferencia que observamos es que las mezclas formadas por agregados de plásticos y la de geopolímero tienen una difusividad térmica mayor que las mezclas PC, HT y CC, debido a que poseen una baja densidad y, por consiguiente, una menor capacidad calorífica volumétrica.

En lo que se refiere al rendimiento de almacenamiento, tenemos que las mezclas con agregados plásticos y la mezcla de geopolímero poseen un mayor rendimiento de almacenamiento que las mezclas PC, HT y CC. Además de una mejor densidad de potencia, 7.5 kWh/ton frente a un 7.7 kWh/ton.

A la vista de los resultados obtenidos, podemos concluir afirmando que un hormigón geopolímero puede ser un material óptimo para ser utilizado como medio de almacenamiento. Aunque la mejor mezcla es A4, el cual obtiene los mejores rendimientos.

## 3.3 INTERCAMBIADOR DE CALOR

La parte esencial de un almacenamiento de energía térmica en hormigón es el intercambiador de calor que se instala en su interior. Este tipo de almacenamiento tiene el inconveniente de su baja transferencia de calor entre el fluido HTF – el intercambiador – hormigón. Por lo que es imprescindible una adecuada elección en la geometría y disposición de del intercambiador. Por ello, la parte más costosa del diseño y construcción de un sistema de almacenamiento de estas características es debido al intercambiador de calor.

### 3.3.1 Geometría del intercambiador de calor

El intercambiador de calor utilizado dentro del módulo de hormigón puede ser de diferente geometría, ilustración.30.

- Intercambiador de calor de tubos liso
- Intercambiador de calor con aletas en forma de barras
- Intercambiador de calor con aletas en forma de disco
- Intercambiador de calor con aletas longitudinales
- Intercambiador de calor con forma helicoidal

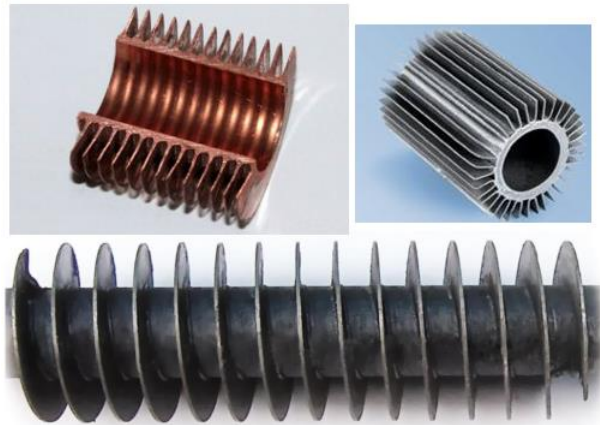


Ilustración 30 Tipología de intercambiadores aleteados

A continuación, ilustración.31, se muestra la distribución de temperatura de tres módulos de hormigones con diferentes geometrías de intercambiadores de calor.

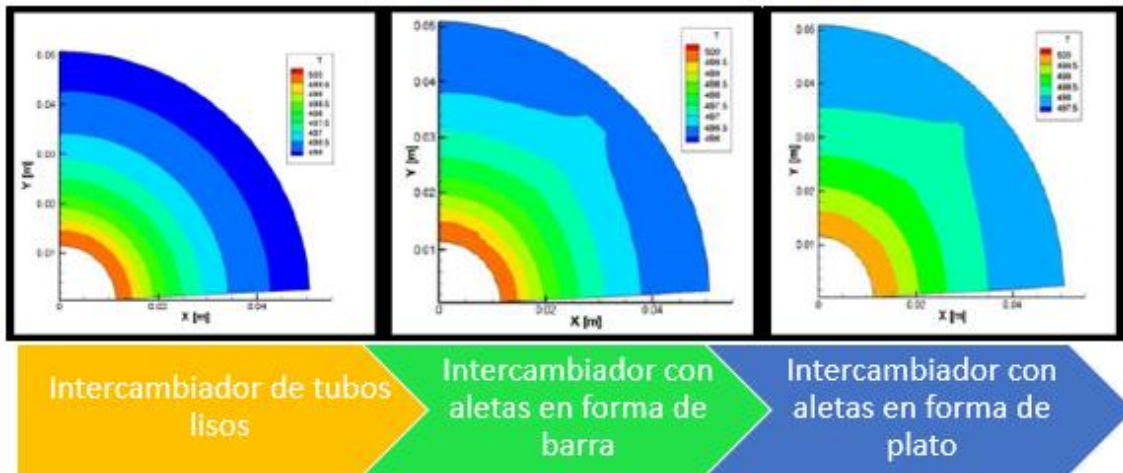


Ilustración 31 Distribución de temperatura de diferentes configuraciones de intercambiador de calor. [Panneer, 2012]

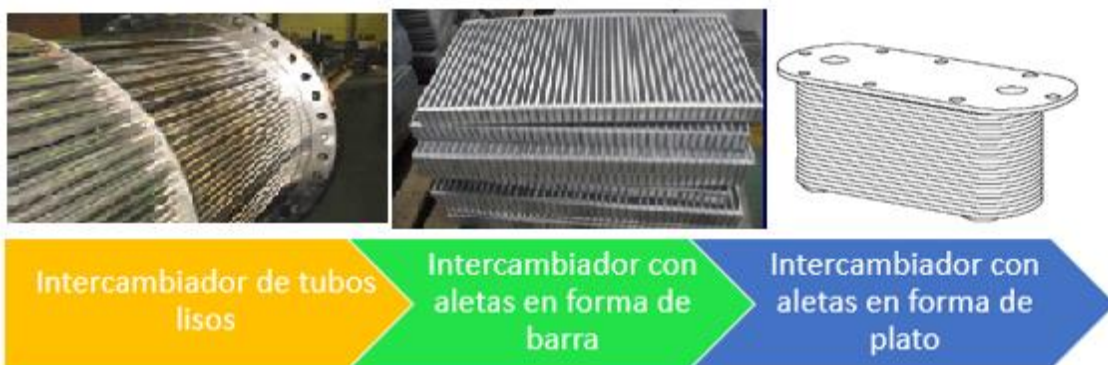


Ilustración 32 Configuración de los intercambiadores utilizados en el ensayo anterior.

A la vista de estas distribuciones de temperaturas, Castro [Castro,2010] realizó unos test sobre el incremento en almacenamiento, material y coste de intercambiadores con diferentes aletas sobre un intercambiador de tubo liso. Los resultados de dicho estudio quedan mostrados en la siguiente tabla, tabla.21.

Aletas		Incremento [%]		
Número	Tipo	Energía almacenada	Material	Coste
1	Barra	0.4	16.39	5.85
2	Barra	0.66	32.79	11.69
4	Barra	1.28	65.57	23.39
6	Barra	1.77	98.36	35.08
8	Barra	2.24	131.12	46.77
1	Disco	1.36	57.27	42.68
2	Disco	2.7	114.54	85.35
3	Disco	3.97	174.80	128.03
4	Disco	4.7	229.07	170.71
1	Plato	5.11	368.41	188.83
2	Plato	8.83	736.83	377.65
5	Espiral	9.13	268.36	382.80
6	Espiral	10.81	343.60	459.40
7	Espiral	12.19	400.91	535.90
9	Espiral	14.28	515.43	689.10

Tabla 21 Resultado de distintas configuraciones de aletas en intercambiadores de calor [Panmeer, 2012]

Podemos concluir afirmando que la geometría óptima para un intercambiador de calor embebido en un bloque de hormigón es de espiral a pesar de su excesivo coste. Aun así, hoy en día, sigue prevaleciendo el uso de intercambiadores de calor lisos en el almacenamiento de calor en hormigón debido a su menor coste.

### 3.3.2 Material del intercambiador de calor

El material más utilizado para los tubos del intercambiador de calor es el acero debido a su buena transferencia de calor hacia el hormigón.

Como todo material, el acero y el hormigón tienen un inconveniente en su uso en conjunto. El inconveniente es la diferencia que existe entre sus coeficientes de expansión térmica. El coeficiente de expansión térmica del acero es mayor que la del hormigón, lo que provoca grietas en el hormigón.

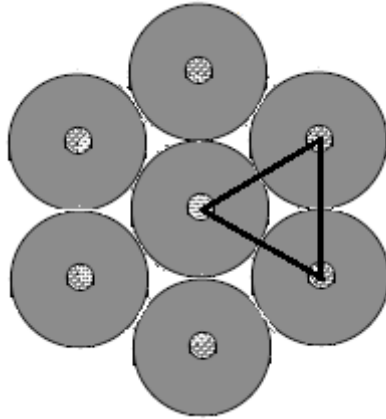
Existen dos soluciones viables, el uso de un material en la interfase entre el tubo del intercambiador y el hormigón o emplear tubos de acero al carbono.

Los materiales potencialmente aptos para colocarlos entre el intercambiador y el hormigón son: cinta de Teflon, Deacon paste y el papel de aluminio. Dentro de este grupo tenemos que el papel de aluminio produce cierta resistencia a la conductividad térmica. Por lo que, el mejor material para la interfase es el Teflon, ya que no interfiere en el intercambio de calor entre el intercambiador y el hormigón.

### 3.3.3 Disposición de los tubos del intercambiador de calor

Los tubos embebidos tienen una disposición dentro del módulo de hormigón en forma triangular, ilustración.33. Esta configuración es la óptima para una correcta distribución de temperatura en el medio sólido.





*Ilustración 33 Distribución triangular del intercambiador de calor [Jian, 2015].*

## 4 CONTROL DE UN MÓDULO DE HORMIGÓN

Un módulo de almacenamiento de energía térmica en sólido está constituido por un bloque de hormigón y un intercambiador de calor tubular embebido en él, ilustración.34.

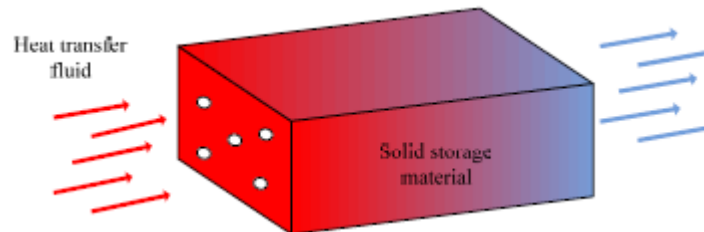


Ilustración 34 Módulo de almacenamiento sólido [Jian, 2015]

El funcionamiento de un módulo de almacenamiento de energía térmica consiste, simplemente en hacer circular el fluido HTF a través del intercambiador embebido por el medio de almacenamiento durante el ciclo. El ciclo consta de la fase de carga y descarga, ambas serán descritas para un módulo de almacenamiento a continuación.

- Carga: Durante esta fase del ciclo, el fluido térmico, proveniente del campo solar, atraviesa el módulo de almacenamiento cediendo su energía térmica al medio sólido, en este caso hormigón, por lo que la temperatura a la que sale el fluido HTF es menor que con la que entró. Una vez que el fluido sale del módulo se redirecciona, de nuevo, al campo solar.
- Descarga: La segunda parte del ciclo tiene un funcionamiento similar a la carga. En este caso, el fluido atraviesa el módulo de hormigón en dirección opuesta absorbiendo el calor del módulo a su paso, por lo que el fluido térmico sale a una temperatura mayor de la que entró. Una vez que el fluido HTF abandona el módulo se dirige a la turbina que constituye el bloque de potencia para generar electricidad.

La temperatura de salida del fluido HTF durante la descarga es decreciente con el tiempo, es decir, el fluido sale más caliente a los 10 minutos de descarga que a los 30 minutos, esto es debido a las pérdidas que tienen lugar en el propio módulo.

A la hora de diseñar un módulo de almacenamiento térmico en hormigón es fundamental tener presente dos limitaciones.

1. La temperatura máxima del fluido a la salida del sistema de almacenamiento durante el proceso de carga. Esta temperatura influye en la temperatura de entrada del fluido al colector.
2. La temperatura mínima del fluido a la salida del sistema de almacenamiento durante el proceso de descarga. Esta temperatura influye en la temperatura de entrada a la turbina.

Por la tanto, podemos decir que el sistema de almacenamiento está totalmente cargado cuando la temperatura de salida del fluido es mayor que la temperatura máxima de entrada al colector. Del mismo modo, decimos que el sistema de almacenamiento está totalmente descargado cuando la temperatura de salida del fluido es menor que la temperatura de operación de la turbina.

## 4.1 DOS MÓDULOS

Es muy común la utilización de dos módulos de hormigón en lugar de uno como sistema de almacenamiento. La razón de este hecho es que aumentamos la capacidad de almacenamiento de un 33.4% a un 38%.

A continuación, se mostrarán las conclusiones obtenidas tras un estudio obtenido de la literatura, [Jian, 2015], de dos configuraciones distintas de módulos de almacenamiento de carga/descarga. Una secuencial y otra en paralelo y observaremos cual de ambas es más beneficiosa.

Para dicho estudio se tomará un hormigón a alta temperatura y como fluido el Therminol VP-1. En la tabla.22 se detalla sus propiedades.

Material	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Calor específico [J/kg K]	Conductividad térmica [W/m K]	Viscosidad [Pa·s]
Hormigón (400°C)	2250	1050	1.20	-
Therminol VP-1 (360°C)	749	2480	0.0844	0.00017

Tabla 22 Propiedades del hormigón y fluido térmico [Jian, 2015]

Las condiciones y propiedades geométricas en las que se ha realizado el estudio se muestran en la tabla.23.

Propiedades de operación	
Temperatura máxima de entrada al colector	330°C
Temperatura mínima de entrada a la turbina	350°C
Temperatura de salida del fluido durante la carga	< 330°C
Temperatura de salida del fluido durante la descarga	>350°C
Temperatura de entrada del fluido durante la carga	390°C
Temperatura de entrada del fluido durante la descarga	290°C
Temperatura inicial del hormigón	290°C
Duración de un ciclo de carga/descarga	6 horas
Propiedades geométricas	
Longitud del almacenamiento	50 m
Diámetro interior del tubo del intercambiador de calor	16 mm
$d_i/d_0$	8

Tabla 23 Condiciones y propiedades del estudio

### 4.1.1 Modo de carga/descarga secuencial

Para el modo de carga/descarga secuencial tomaremos una temperatura de entrada del fluido de 390°C durante la carga y una temperatura de entrada del fluido de 290°C durante la descarga. En la ilustración.35 podemos observar un esquema.

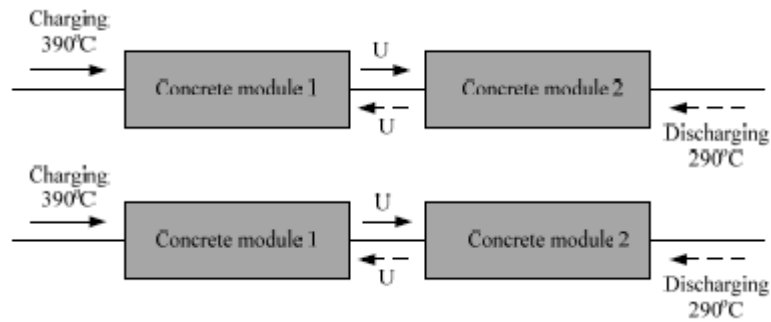


Ilustración 35 Esquema del modo de carga/descarga secuencial [Jian, 2015]

En este modo de carga/descarga el hormigón no es completamente utilizado debido a que la temperatura media del hormigón cerca de la salida es demasiado baja cuando el módulo está completamente cargado y es demasiado alta cuando el módulo está completamente descargado.

En el ensayo, el módulo de almacenamiento trabaja entre 323.3°C y 356.7°C. La diferencia de temperatura del medio sólido es de 33.35°C, lo que se traduce en una utilización del material de almacenamiento de 33.4%.

#### 4.1.2 Modo de carga modular

La temperatura media del almacenamiento después de la carga depende de la temperatura de salida permitida. Una opción para aumentar la temperatura de salida permitida es la división del colector solar en secciones. Esta opción aumenta la capacidad del sistema de almacenamiento. Una imagen esquemática de este tipo de configuración de almacenamiento se puede ver en la ilustración. 36.

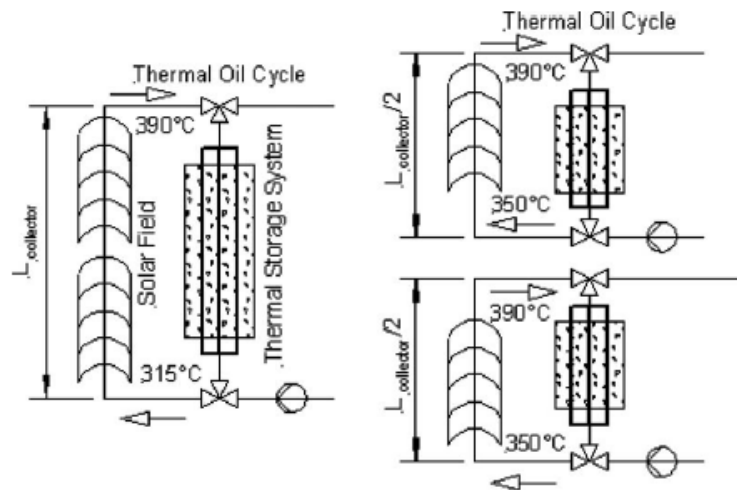


Ilustración 36 Carga modular de un sistema de almacenamiento [Laing, 2010]

#### 4.1.3 Modo de descarga modular

La utilización del sistema modular para la fase de descarga ofrece ciertas ventajas. Como bien sabemos el uso de aceite térmico para calentar un evaporador se asocia a unas pérdidas exergéticas debido a la diferencia de temperatura entre el aceite y el vapor a calentar. Estas pérdidas se reducen dividiendo la unidad de almacenamiento en tres secciones separadas, proporcionando energía al sobrecalentador, evaporador y precalentador. En la ilustración. 37 se muestra un esquema de una descarga modular.

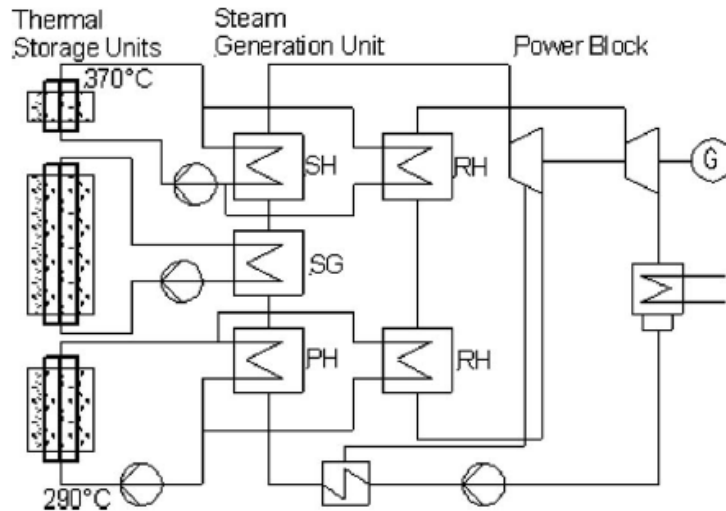


Ilustración 37 Modo de descarga modular [Laing, 2010]

En este caso, la temperatura del aceite a la entrada del evaporador es independiente a la temperatura de salida del sobrecalentador, por lo que la diferencia de temperatura media en los intercambiadores es menor. Esta disminución en la diferencia de temperatura media favorece la capacidad de almacenamiento, como ocurre en el caso de carga modular.

#### 4.1.4 Modo de carga/descarga modular

El tipo de carga/descarga modular, ilustración. 38, consiste en la colocación de dos módulos en paralelo. Este hecho produce que durante el proceso de carga la temperatura en el módulo 1 sea constante y la temperatura en el módulo 2 aumente, por lo que en conjunto la temperatura durante el proceso de carga aumenta de 356.7°C a 359.0°C. De forma similar sucede en el proceso de descarga, la temperatura del módulo 2 es constante mientras que la del módulo 1 decrece, por lo que en conjunto la temperatura desciende de 323.3°C a 321.0°C.

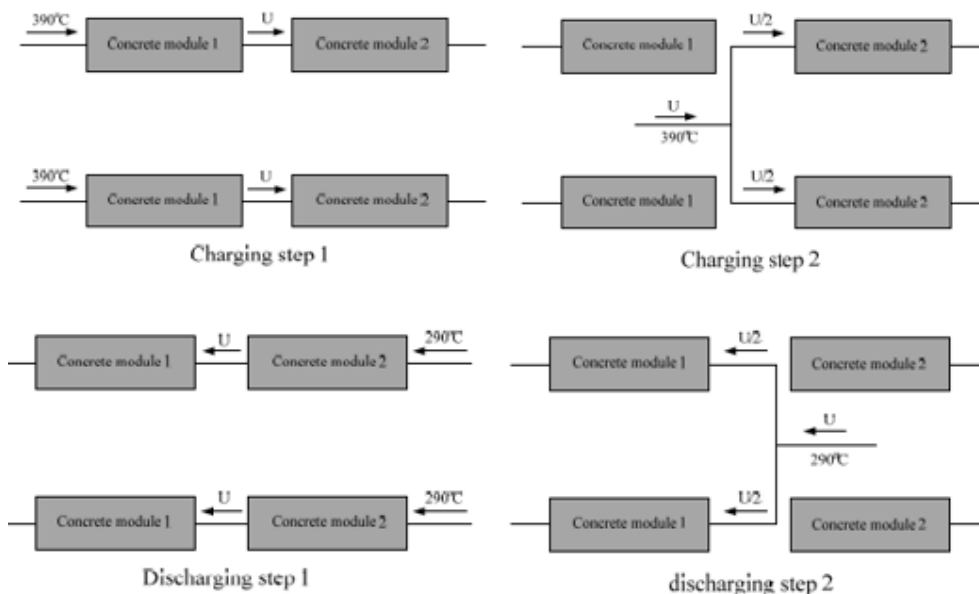


Ilustración 38 Método de carga/descarga en paralelo. [Jian, 2015]

La diferencia de temperatura en este modo es de unos 38.03°C, lo que provoca un aumento en la utilización del material de almacenamiento en un 4.6%.

El trabajo eléctrico se ve mejorado tanto para el modo de carga y descarga modular a unos 190 MWh y 210 MWh respectivamente. Cuando combinamos la carga y descarga modular el trabajo eléctrico se extiende a unos 280 MWh, lo que representa un incremento del 115% en comparación con el caso de carga/descarga normal, secuencial. En la ilustración. 39, que se muestra a continuación, se puede observar la mejora en el trabajo eléctrico obtenido, comentada anteriormente, durante la operación del almacenamiento en una planta de 50 MW. En la ilustración. 40 se muestra la capacidad eléctrica en función de la configuración de almacenamiento.

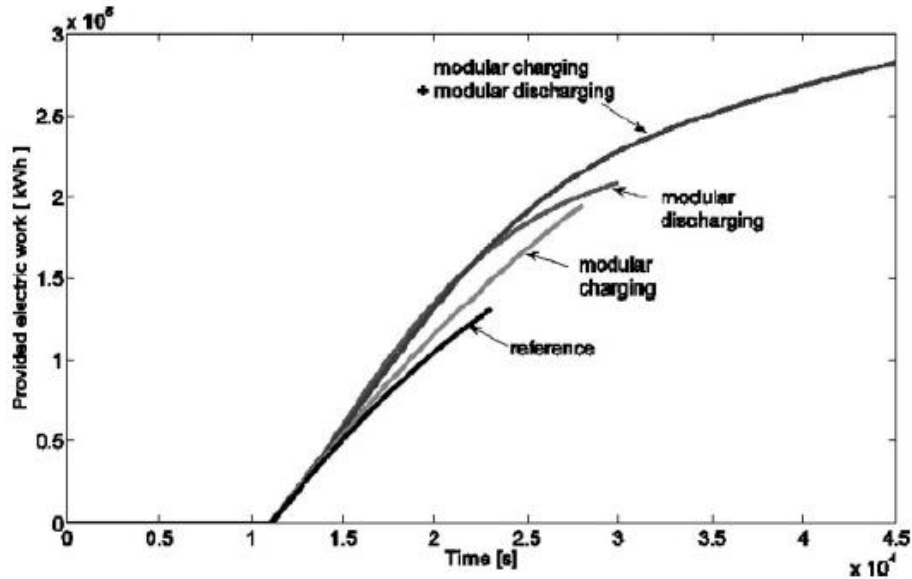


Ilustración 39 Energía eléctrica proporcionada en función de la configuración del sistema de almacenamiento en una planta de 50 MW [Laing, 2010]

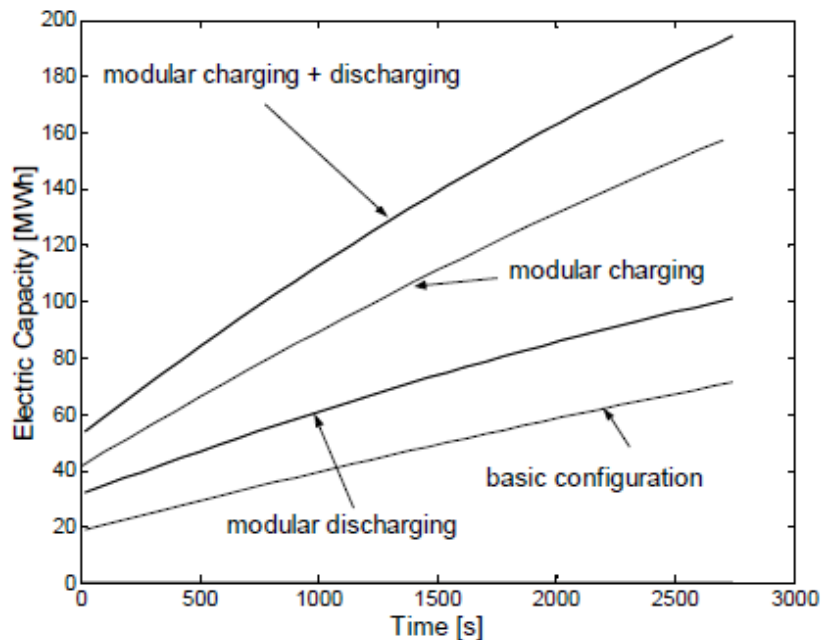


Ilustración 40 Capacidad eléctrica en función de la configuración del sistema de almacenamiento [Tamme, 2003]

La disposición del módulo de almacenamiento con carga y descarga modular de forma individual o conjunta requiere de una serie de equipos extras de tuberías aisladas térmicamente, bombas, válvulas y el control de estas.

## 5 PLANTAS CON ALMACENAMIENTO TÉRMICO DE HORMIGÓN INTEGRADO

---

Una vez finalizado el estudio de los diferentes tipos de hormigones, así como de las posibles configuraciones de los módulos de hormigón en una planta termosolar pasaremos a describir los distintos proyectos que se han llevado a cabo desde el año 2001 hasta nuestros días en lo referente al almacenamiento de energía térmica en hormigón.

En primer lugar, nos encontramos con el proyecto WESPE, desarrollado por el Centro Aeroespacial Alemán (DLR), el cual fue el primero en promover la utilización a gran escala del hormigón como medio de almacenamiento de energía térmica. A la finalización del proyecto WESPE se consiguió obtener una capacidad de almacenamiento de 350 kWh con unos costes asociados de 20 €/kWh<sub>th</sub>. A partir de este proyecto fueron surgiendo otros, proyecto Stuttgart, con el fin de mejorar tanto la capacidad de almacenamiento térmico, como la reducción de los costes asociados a los equipos extras necesarios para su implantación y utilización. En el proyecto Stuttgart se consiguió llegar a una capacidad de almacenamiento de 474 kWh.

El proyecto más reciente fue llevado a cabo por el instituto Masdar en Abu Dabi, en el cual se prueba el novedoso módulo NEST, de la compañía NEST S.A., creado con su propia mezcla de hormigón, Heatcrete®. Este proyecto da a conocer su perfecto funcionamiento a escala de planta real, llegándose a obtener hasta 1MWh<sub>th</sub> de almacenamiento de energía térmica.

### 5.1 PROYECTO WESPE

El Centro Aeroespacial Alemán (DLR) financiado por el Gobierno Alemán desarrollo el proyecto WESPE ubicado en la plataforma solar de Almería, en España. La duración del proyecto fue de tres años [2001 - 2003].

El propósito principal del proyecto WESPE era obtener un sistema de almacenamiento sensible en medios sólidos para centrales termosolares de canal parabólico con unos costes específicos inferiores a los 20 €/kWh de capacidad térmica y 0.01 €/kWh<sub>e</sub> y, además, probar la viabilidad de esta tecnología mediante una unidad de prueba de 350 kWh.

#### 5.1.1 Descripción de la planta

En la planta solar donde se realiza el proyecto WESPE está compuesto por tres zonas bien diferenciadas el campo solar, el sistema de almacenamiento y el campo de potencia. A continuación, se describirá brevemente las dos primeras zonas.

El campo solar se encuentra formado por un lazo de 125 m formado por cilindros parabólicos, el cual proporciona una potencia térmica máxima de 480 kW. El fluido térmico utilizado es aceite sintético.

El sistema de almacenamiento está formado por dos bloques de 350 kWh cada uno con unas temperaturas máximas de 390°C. Los bloques de almacenamiento, de unas dimensiones de 0.48·0.48·23 m<sup>3</sup>, están realizados en dos materiales distintos, uno con cerámica moldeable y otro con hormigón.

Los componentes de la cerámica moldeable utilizada es principalmente Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> como aglutinantes, agregados de óxidos de hierro y de acero y diversos materiales auxiliares. Respecto a los componentes del hormigón de alta temperatura tenemos cemento como aglutinantes, agregados de óxidos de hierro y cenizas, así como una pequeña cantidad de materia auxiliar. Las propiedades



de ambos materiales se muestran en la tabla.24. Ambos materiales son estables tanto a la temperatura de trabajo como a la temperatura ambiente.

Propiedades	Cerámica moldeable	Hormigón de alta temperatura
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	3500	2750
Capacidad térmica específica a 350 °C [J/kg K]	866	916
Conductividad térmica a 350°C [W/m K]	1.35	1.0
Coefficiente de expansión térmica a 350°C [10 <sup>-6</sup> /K]	11.8	9.3
Dureza del material	Bajo	Medio
Iniciación de la grieta	Casi ninguna grieta	Varias grietas

*Tabla 24 Propiedades de los materiales de almacenamiento [Laing, 2006]*

Los intercambiadores de calor embebidos por el medio de almacenamiento están compuestos por 36 tubos de acero a alta temperatura. Los colectores y los distribuidores son diseñados para garantizar una distribución de flujo uniforme en todos los tubos. En la ilustración.41, podemos observar la conexión entre los intercambiadores de las diferentes unidades de almacenamiento.

Por otro lado, los módulos de cerámica moldeable y de hormigón a alta temperatura se expanden aproximadamente 125 mm y 120 mm respectivamente. Por lo que, para permitir este movimiento los módulos reposan en hojas de metal que actúan como planos deslizantes. Otros dispositivos necesarios para la integración del sistema de almacenamiento en la planta solar se detallan a continuación.

- 208 termopares
- 2 medidores de flujo
- 2 sensores de presión diferencial
- 8 termopares Pt-100



*Ilustración 41 Conexión de los intercambiadores de calor en las unidades de almacenamiento [Laing, 2006]*

Las pérdidas de las unidades de almacenamiento son minimizadas con un aislamiento térmico. Este aislamiento envuelve a las unidades individualmente.

### 5.1.2 Funcionamiento

Cómo se comentó en la descripción, el campo solar puede garantizar un máximo de 480 kW y las unidades de almacenamiento son diseñadas para una potencia de 350 kW, lo que permiten unos 34 kW de pérdidas térmicas entre el propio almacenamiento y las tuberías cuando se tiene una insolación media de  $800 \text{ W/m}^2$ .

Las conexiones entre las cuatro unidades de almacenamiento se encuentran realizadas en serie aquellas que son del mismo material y en paralelo los que son de diferente material, en la ilustración.42 observamos la conexión entre la planta solar y los módulos de almacenamiento.

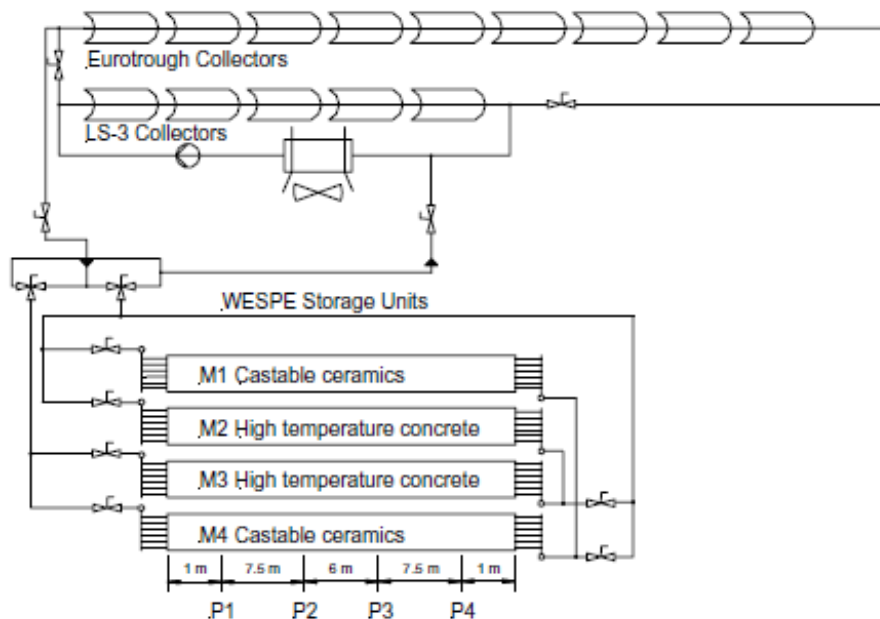


Ilustración 42 Esquema de la planta solar del proyecto WESPE [Laing, 2006]

La sección P1 es la entrada de los módulos y la P4 es la salida de los módulos, por lo que durante la carga la sección más caliente es P1 y la más fría durante la descarga. En las ilustraciones 43 y 44, se muestra la evolución tanto de las temperaturas como de la potencia de los módulos y del aceite durante dos ciclos completos de carga/descarga. La potencia transferida por el aceite a los módulos de almacenamiento es calculada a partir de las temperaturas de entrada y de salida del fluido HTF. La integración de estas curvas da como resultado un total de energía de entrada a los módulos de almacenamiento de 391 kWh y una potencia total a través del aceite de 175 kW durante la descarga de los dos ciclos. Las pérdidas netas de calor de la unidad de almacenamiento durante las 7h de funcionamiento son de 24 kWh.

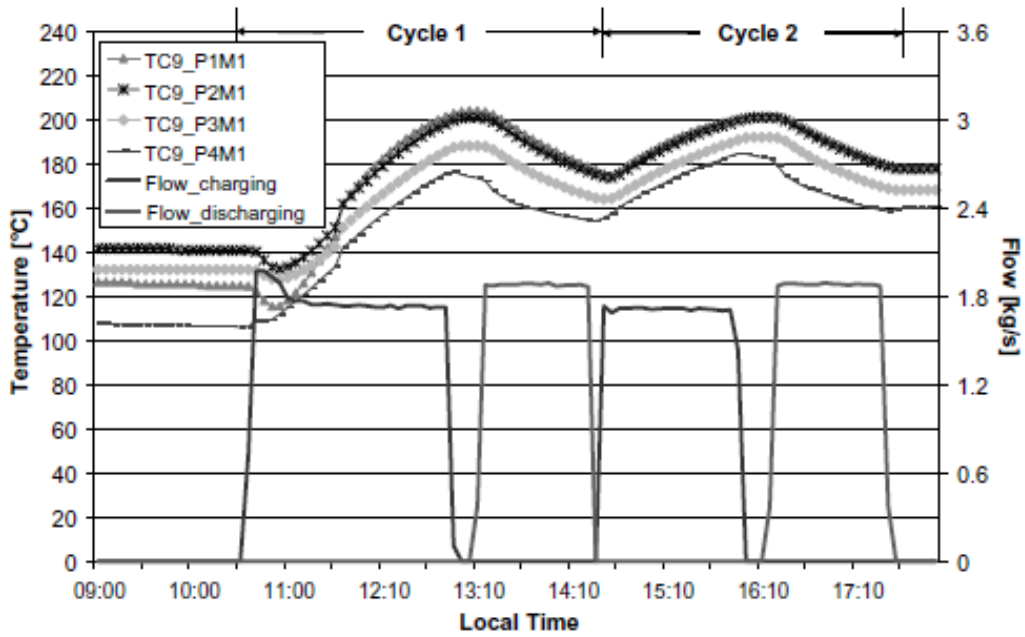


Ilustración 43 Distribución de las temperaturas en el módulo y del aceite térmico durante los dos ciclos [Laing, 2006]

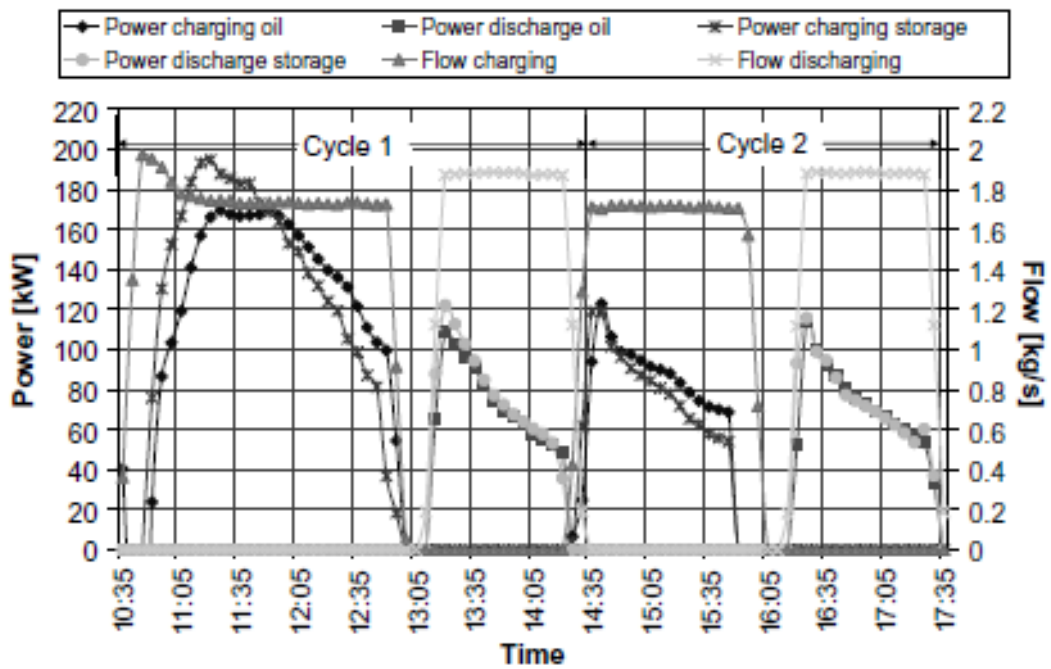


Ilustración 44 Evolución de la potencia tanto del fluido térmico como de los módulos durante los dos ciclos [Laing, 2006]

A pesar de tener el módulo de almacenamiento de cerámica moldeable unos parámetros mejores que el módulo de hormigón, tabla.25, ambos módulos trabajan prácticamente con los mismos gradientes de temperaturas. Además, el aumento de la temperatura de las unidades de almacenamiento es para ambos materiales el mismo durante el tiempo de funcionamiento.

Capacidades de almacenamiento	20%
Conductividad térmica	35%
Velocidad del flujo a través del módulo	10%
Diferencia entre la temperatura de entrada y salida del aceite	15%
Potencia transferida al módulo de almacenamiento de cerámica moldeable	25%

Tabla 25 Incremento de los parámetros de los módulos de almacenamiento de cerámica moldeable frente a los del hormigón de alta temperatura

Después de 60 ciclos térmicos no se observó ninguna degradación térmica entre en intercambiador de calor y el material de almacenamiento térmico.

Finalmente, el proyecto WESPE concluyó que el hormigón a alta temperatura es un perfecto material para su utilización como medio de almacenamiento debido a su resistencia, fácil manejo y reducido coste.

## 5.2 PLANTA SOLAR EN STUTTGART (ALEMANIA)

Tras el proyecto WESPE realizado por el Centro Aeroespacial Alemán, Ed. Züblin AG se unió a la realización de un segundo proyecto. Este proyecto, iniciado en 2008, tiene como objetivo, por un lado, el desarrollo del almacenamiento de energía térmica en hormigón y, por otro lado, la reducción de costes.

### 5.2.1 Descripción de la planta

Los ensayos de los módulos de almacenamiento se llevan a cabo en una planta tipo ANDASOL. Un esquema tipo de esta planta es mostrada en la ilustración.45, la cual utiliza como captador solar unos cilindros parabólicos.

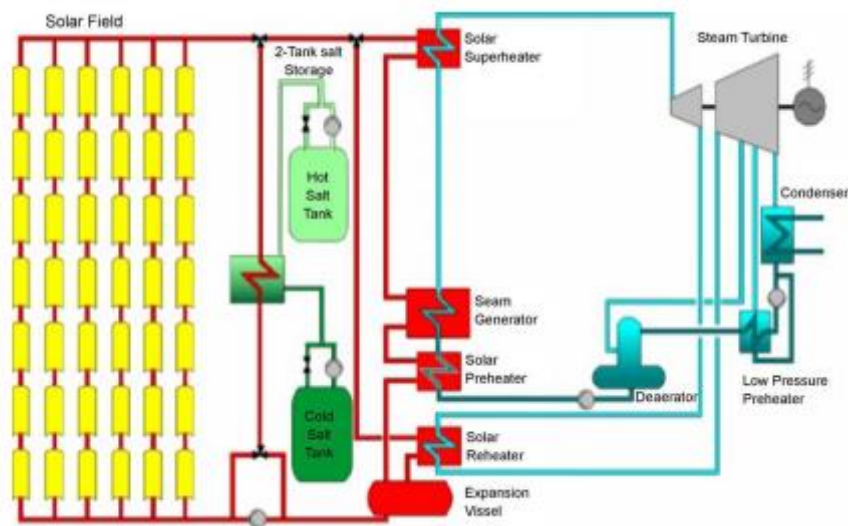


Ilustración 45 Esquema general de la planta ANDASOL

En primer lugar, se describirá el módulo de almacenamiento térmico. El primer módulo de almacenamiento resultó dañado durante la fase de puesta en marcha debido a la acumulación de vapor en su interior. Como ya sabemos, durante el primer calentamiento del hormigón, el agua contenida en él se evapora y si el vapor no tiene suficientes vías de escape, se empieza a acumular en su interior produciendo un aumento en la presión produciendo daños en el módulo. Por lo que,

se realizó un segundo módulo de prueba compuesto, entre otros materiales, por fibras de polietileno para aumentar la permeabilidad del módulo.

A este segundo módulo de prueba se le integra un intercambiador de calor compuesto por 132 tubos de 9 m de longitud y 18 mm de diámetro exterior. El registro de tubos está dispuesto en paso triangular.

Para evitar la contaminación del suelo en caso de alguna fuga de aceite térmico, el módulo es colocado sobre una cubeta de acero, sobre el cual se ha colocado previamente un aislante térmico. A continuación, se muestra en la ilustración.46 una serie de imágenes donde encontramos la constitución del registro de tubos, del aislamiento de suelo y el módulo finalizado y colocado respectivamente.

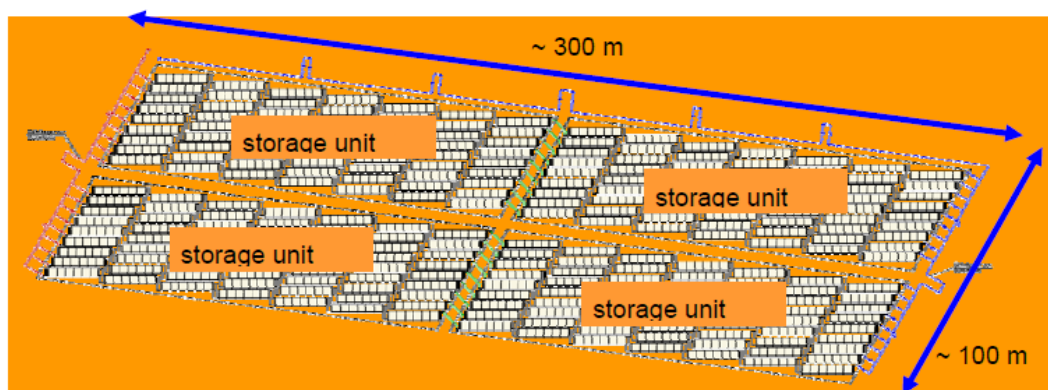


*Ilustración 46 Registro de tubo, base térmica y módulo finalizado y colocados del proyecto Stuttgart respectivamente [Laing, 2008]*

Sensores de temperatura, de flujo y de presión son equipos adicionales instalados en diferentes zonas del módulo de almacenamiento para el control de sus parámetros durante su puesta en marcha y funcionamiento.

La capacidad del módulo constituido es de 474 kWh, lo que corresponde con una capacidad específica de 25.6 kWh/m<sup>3</sup>.

Al aplicarlo a una planta tipo ANDASOL de 50 MWe se requiere de un almacenamiento de energía térmica en sólido (hormigón) con una capacidad total de 1.100 MWh acumulados en 252 módulos de hormigón agrupados en 4 unidades de 63 módulos cada una. Los módulos de hormigón se encuentran conectados en serie y en paralelo. En la ilustración.47 mostrada a continuación observamos la disposición del almacenamiento térmico descrito anteriormente.



*Ilustración 47 Distribución del almacenamiento térmico para una planta tipo ANDASOL [Laing, 2008]*

### 5.2.2 Funcionamiento

La puesta en marcha del módulo comenzó en mayo del 2008 y tras una exitosa puesta en marcha del módulo, la cual consistía llevar el módulo de almacenamiento desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de trabajo, 400°C, el módulo se sometió a una serie de ciclos térmicos de carga/descarga. Pasado cuatro meses del funcionamiento se comprobó que el módulo funcionaba en un rango de temperatura de 300°C - 400°C y había realiza alrededor de 50 ciclos térmicos con una diferencia de temperatura de 40K. Durante este tiempo el rendimiento de la planta fue constante.

Tras dicho tiempo, se comprobó los valores obtenido experimentalmente con los valores teóricos supuestos son bastante similares, por lo que la herramienta de simulación es apta para utilizarla como diseño a una mayor escala de módulos de almacenamiento térmico en hormigón para aplicaciones comerciales. En la ilustración.48 se observa dicha comparativa.

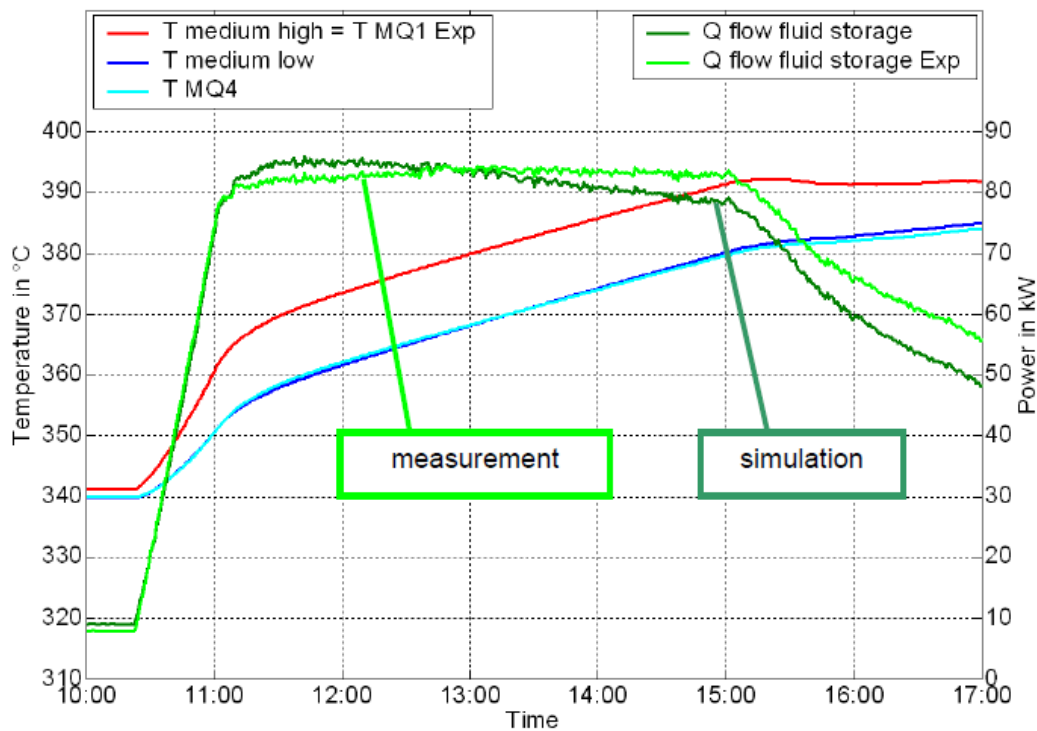


Ilustración 48 Comparación de los valores teóricos y reales del módulo del proyecto Stuttgart [Laing, 2008]

### 5.3 INSTITUTO MASDAR PLATAFORMA SOLAR (PSIM) EN ABU DABI

La compañía NEST S.A. ha desarrollado un sistema de almacenamiento térmico usando hormigón como medio de almacenamiento. La mezcla de hormigón utilizada es Heatcrete®, desarrollada en el capítulo 3.1.4. En la ilustración.49, se muestra un esquema genérico de un módulo NEST de almacenamiento térmico.

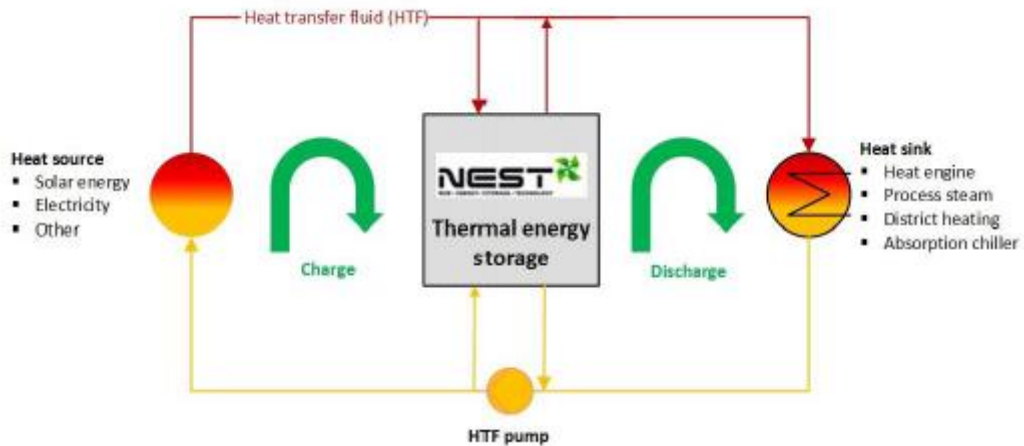


Ilustración 49 Esquema de un módulo de almacenamiento NEST [Bergan, 2014].

El módulo de almacenamiento NEST puede ser configurado según la aplicación que vaya a tener. Sin embargo, genéricamente, se encuentra constituido por columnas verticales, que pueden ser conectados y dispuestos de forma paralela y en serie con respecto a la dirección del flujo HTF. Además, incluye una serie de tuberías y válvulas que controlan el flujo de HTF a través del sistema durante la carga/descarga. El suelo, las paredes y el techo se encuentran aislados térmicamente reduciendo las pérdidas a un 1% durante 24 horas.

Este tipo de módulo de almacenamiento puede ser instalado prácticamente en cual zona de la planta, incluso puede ser parcial o completamente enterrado en el suelo de tal manera que el espacio de arriba puede ser utilizado para otros fines. A continuación, se presenta un módulo de almacenamiento NEST integrado en una planta piloto constituida por la misma compañía.

La planta piloto, Plataforma Solar (PSIM), localizada en la ciudad de Masdar en Abu Dabi, Emiratos árabes, fue constituida a finales del 2014 para probar el sistema de almacenamiento NEST a altas temperaturas (393 °C). La planta piloto se compone por colectores cilindros parabólicos y dispone de un módulo de almacenamiento constituido por 4 unidades integradas de 250 kWh<sub>th</sub> cada uno, es decir de 1.0 MWh<sub>th</sub> de almacenamiento total. En la ilustración.50, se muestra una imagen de la planta piloto.



Ilustración 50 Planta piloto PSIM en Abu Dabi [Bergan, 2014].

### 5.3.1 Descripción de la planta

El campo solar está constituido por un campo de 33 heliostatos de 8.5 m<sup>2</sup> dispuestos en tres anillos que rodean la torre central, de 19 m de altura, a una distancia máxima de la torre de 18 m. Cada heliostato se encuentra constituido por 42 espejos individuales dispuestos en tres grupos. La luz solar que inciden en cada heliostato es reflejada hacia unos espejos secundarios situados en la parte superior de la torre y estos reflejan la luz hacia el receptor situado a los pies de la torre, a nivel del suelo. El receptor solar tiene un área de apertura de 2.25 m<sup>2</sup> y está compuesto por tubos de aceros por los que circula el aceite HTF (en este caso aceite sintético). Este tipo de estructura facilita su construcción, mantenimiento y operación a pesar de tener un factor solar menor que las instalaciones de torres convencionales. En la ilustración.51 y 52, se muestra, por un lado, la dirección de la radiación solar y, por otro lado, las partes de la planta que han sido descritas anteriormente.

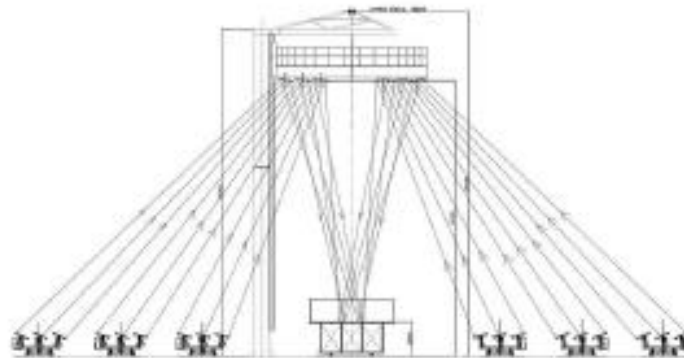


Ilustración 51 Esquema de la planta solar [Matthieu, 2015].



Ilustración 52 Partes de la planta solar [Matthieu, 2015].

Esta planta piloto dispone, además, de un calentador eléctrico que permite, por un lado, tener una irradiación solar adecuada durante la simulación y, por otro lado, una lenta deshidratación del hormigón durante el primer calentamiento de la unidad de almacenamiento.

### 5.3.2 Funcionamiento

En la ilustración.53, se muestra en el esquema P&ID simplificado de la planta, donde se puede observar cada una de las partes que conforman la planta piloto, junto con los parámetros de diseño especificado en la tabla.26.



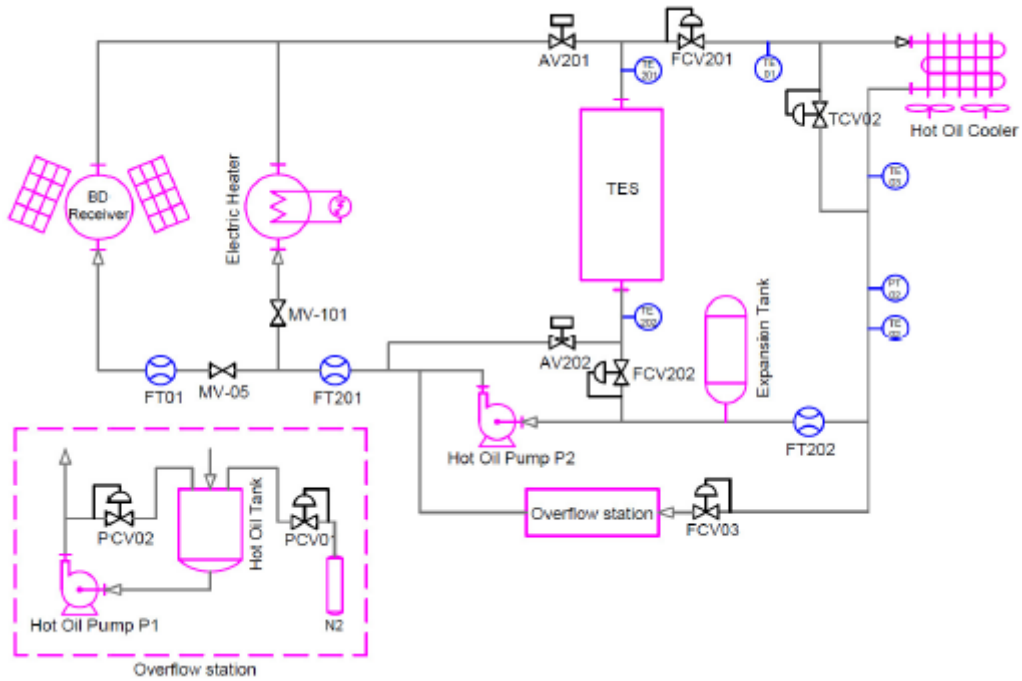


Ilustración 53 P&ID simplificado de la planta piloto en Abu Dabi [Bergan, 2014].

HTF	Downtherm® A
Presión de diseño	16 bar
Tiempo de descarga	5 h
Temperatura de entrada durante la carga	390 °C
Temperatura de salida durante la descarga	290 °C
Gasto másico de HTF	0.1 – 1.0 kg/s
Energía útil del HTF	100 kW <sub>th</sub>

Tabla 26 Parámetros de diseño

## 6 DATOS ECONÓMICOS Y PERSPECTIVAS

La aplicación de almacenamiento en medios sólidos es una opción atractiva en términos de inversión y de costes de mantenimientos. Los datos encontrados en la literatura muestran una disminución de costos de energía cuando la integración del almacenamiento es modular, entorno a un 2 – 3 %.

Para dar a conocer algunos datos económicos realizaremos un análisis comparativo entre las diversas configuraciones del sistema de almacenamiento (Configuración básica, con carga modular, con descarga modular y carga/descarga modular) en una planta cuyas características se detallan en la tabla.27 mostrada a continuación.

Configuración de la planta	
Localización	Sur de España
Tipo de planta	Cilindro – parabólica
Potencia de la turbina [MW <sub>e</sub> ]	50
Capacidad del almacenamiento [MW <sub>e</sub> ]	299
Campo solar [m <sup>2</sup> ]	470.880
Energía térmica de salida [MWh]	448.043
Energía térmica perdida	7.9%
Energía eléctrica neta vertida a la red [MWh <sub>e</sub> /yr]	167.088

Tabla 27 Características de la planta [Laing, 2010]

Los costes para cada una de las configuraciones se separarán en dos bloques principales, el bloque de costes propios del sistema de almacenamiento de energía térmica y el bloque de los costes de los componentes adicionales. Los componentes adicionales tenidos en cuenta son: bombas, tuberías, válvulas, soportes, fundiciones, estructuras de acero, el fluido HTF necesario, tanque, equipos eléctricos. Además, se contabilizará tanto la instrumentación y el control como la construcción y la ingeniería necesaria para la implantación de estos equipos.

En la tabla.28 se muestran, por un lado, los costes asociados a la adquisición, construcción e ingeniería de las diferentes configuraciones de sistemas de almacenamientos (CACI), en donde se engloban los costes específicos tanto del almacenamiento de energía (CAE) como de los equipos adicionales. Por otra parte, también se detalla los costes a nivel de energía (CNE). Los costes de mantenimientos y de operación no han sido considerados por tener un impacto leve en el conjunto.

	Básica	Carga modular	Descarga modular	Carga/Descarga modular
CAE [€/kWh]	30.4	20.5	19.1	14.1
CACI [€]	248 958	245 817	244 831	242 251
CNE [€/MWh]	200	198	197	195

Tabla 28 Datos económicos de las diferentes configuraciones de almacenamiento térmico en hormigón [Laing, 2010]

Como podemos observar en la tabla.28, los costes específicos del almacenamiento de energía térmica disminuyen conforme el sistema va adquiriendo la configuración de carga o descarga o ambas fases de manera modular. Por otro lado, hay que decir que esta disminución de costes en el almacenamiento de energía se ve compensado significativamente con la integración de los equipos adicionales necesarios mencionados anteriormente. Aun así, observamos que el concepto modular ofrece una disminución de costes a nivel de energía entorno al 2%.

## 6.1 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Para finalizar este trabajo, se realizará un análisis comparativo de ciclo de vida, según la ISO 14040 ff, a una planta tipo ANDASOL-I con dos tipos de almacenamiento térmico. Por un lado, un sistema de dos tanques de sales fundidas y, por otro lado, utilizando hormigón como medio de almacenamiento.

En la tabla. 29, se detalla las características de la planta en función de los dos tipos de almacenamiento utilizado. La planta ANDASOL-I trabaja con una potencia de 50 MW<sub>e</sub>. En la ilustración. 54 se muestra la configuración de la planta con los distintos tipos de almacenamiento.

	Sales fundidas	Hormigón
Capacidad de almacenamiento [MWh <sub>e</sub> ]	354	300
Tiempo de almacenamiento [h]	7.5	6
Electricidad producida	46	50

Tabla 29 Parámetros de la planta según el almacenamiento utilizado

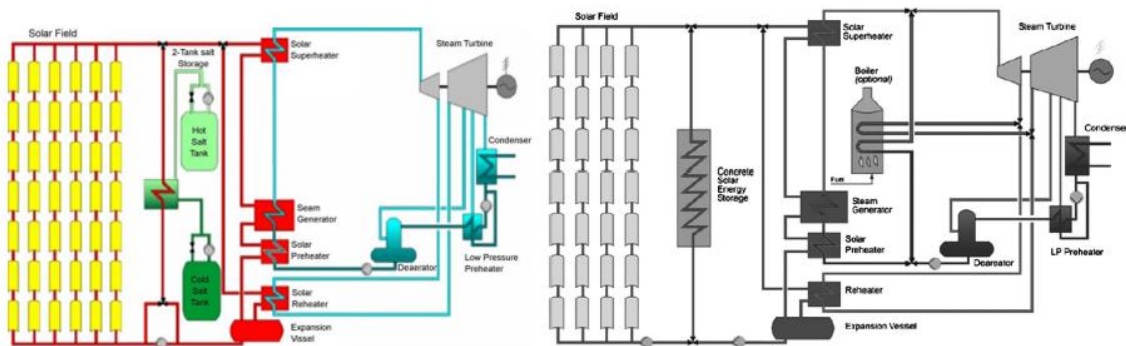


Ilustración 54 Planta tipo ANDASOL- I con almacenamiento en sales fundidas (izquierda) y en hormigón (derecha)

Ambos sistemas de almacenamiento causan un cierto impacto medioambiental. Por un lado, la formación de las sales fundidas (60% NaNO<sub>3</sub> y 40% KNO<sub>3</sub>) producen unas emisiones de N<sub>2</sub>O favoreciendo al efecto invernadero mientras que, por otro lado, la formación del hormigón utilizado para el almacenamiento térmico origina unas emisiones de CO<sub>2</sub> y de CH<sub>4</sub>. En la ilustración.55, mostrada a continuación, muestra la participación de cada componente del hormigón en las emisiones de CO<sub>2</sub> y de CH<sub>4</sub>.

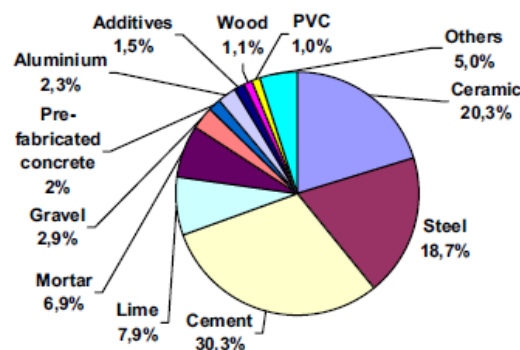


Ilustración 55 Contribución de emisiones de CO<sub>2</sub> en la elaboración del hormigón [Zabalza, 2011]

La diferencia se encuentra en que la cantidad y la participación en el efecto invernadero de las emisiones producidas por el hormigón son menores que las realizadas por las sales fundidas.

En la ilustración.56 y 57 se muestran los diferentes impactos medioambientales producido por la planta solar ANDASOL – I utilizando el sistema de almacenamiento de dos tanques y un sistema de almacenamiento en hormigón respectivamente.

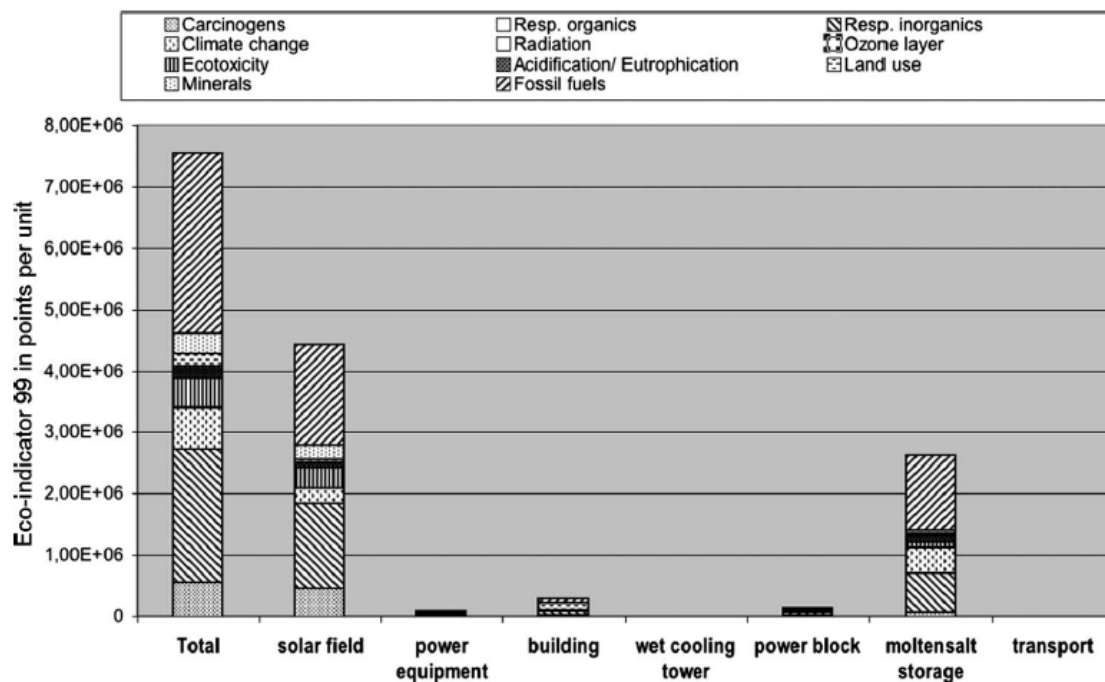


Ilustración 56 Impacto medio ambiental producido por la planta ANDASOL- I utilizando sales fundidas como almacenamiento térmico [Laing, 2010]

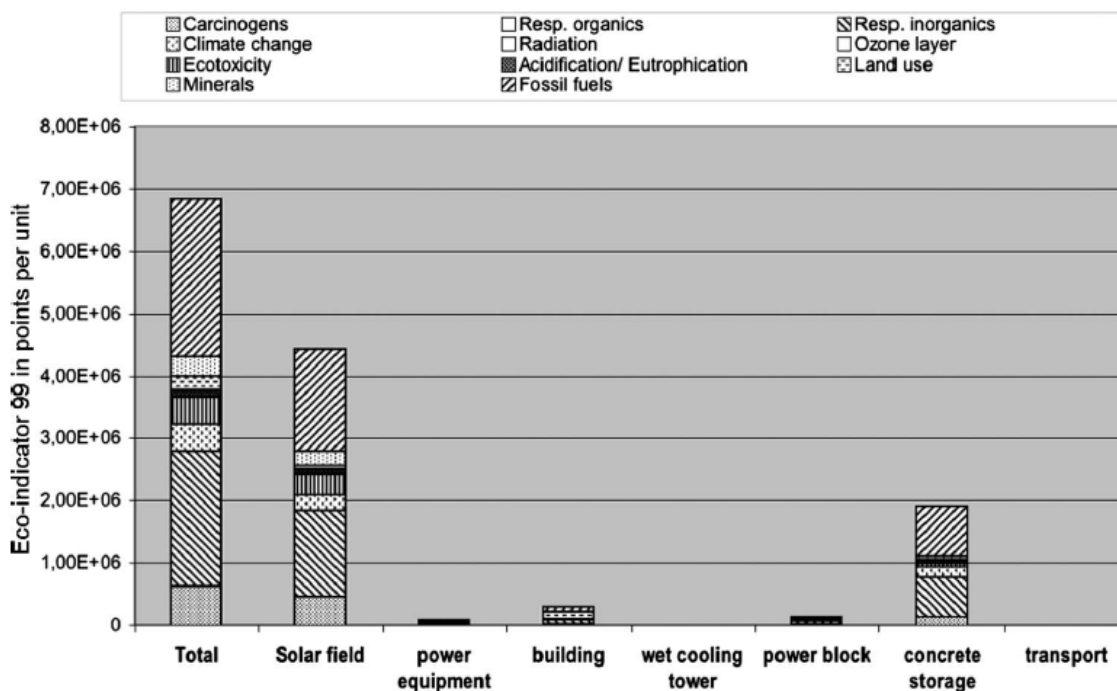


Ilustración 57 Impacto medio ambiental de la planta ANDASOL- I usando hormigón como medio de almacenamiento [Laing, 2010]

Observamos como la utilización de hormigón como medio de almacenamiento reduce el impacto medio ambiental en un 7% considerando 1 kWh de energía solar entregada a la red.

## 7 CONCLUSIONES

---

La integración de un sistema de almacenamiento en una planta termosolar es fundamental para llegar a una generación de electricidad futura independiente, es decir, sin la necesidad de recurrir al carbón o al petróleo. El sol nos ofrece 174 PW de energía solar cada día, de los cuales, el 70% son aprovechables. La cantidad de energía que una planta termosolar es capaz de transformar en electricidad depende de la radiación solar que haya ese día, por lo que si incorporamos un sistema de almacenamiento podemos tanto generar electricidad como cubrir los picos de demanda independientemente de las condiciones climatológicas y de la hora del día.

Los tipos de sistemas de almacenamiento desarrollados y utilizados hasta la fecha han sido el almacenamiento en termoclina, acumuladores de vapor, sistemas de lecho fluido y el almacenamiento en dos tanques de sal fundida. Este último, es el almacenamiento más utilizado debido a que es el tipo de almacenamiento más fácil de instalar y el que presenta mayor rendimiento. A pesar de la diversidad de almacenamiento existentes, en 2001 se empezó a investigar y a ensayar un nuevo sistema pasivo de almacenamiento en sólido. Este tipo de almacenamiento consiste en un bloque de hormigón con un sistema de transferencia instalado en su interior. La razón principal que mueve el interés en la investigación de un nuevo sistema de almacenamiento es debido la combinación de su reducido coste y su elevada conductividad térmica.

El hormigón es un material que posee buenas propiedades térmicas y mecánicas, pero al trabajar a unas temperaturas relativamente elevadas este sufre ciertas reacciones y transformaciones que afectan a sus propiedades. Para ello, durante años, se han llevado a cabo diversas investigaciones sobre las posibles combinaciones de materiales y agregados que mejoren las propiedades del hormigón a temperaturas elevadas. En la actualidad, nos encontramos una gran variedad de mezclas de hormigones reforzados con fibras de polipropileno, PET reciclado, nylon que mejoran la permeabilidad, la resistencia, la vida útil entre otras propiedades. También existen hormigones con agregados plásticos, geopolímeros y con grafito entre otros. Esto agregados pueden llegar a mejorar entre 1% y 5% la conductividad térmica, la capacidad de almacenamiento térmico y la resistencia mecánica.

El hormigón más novedoso en el ámbito del almacenamiento de energía térmica es el desarrollado por la empresa EnergyNest denominado “Heatcrete®”, cuyo rango de temperatura de trabajo es de 50°C a 550°C.

En lo referente al intercambiador de calor, este debe ser de un material adecuado para favorecer la transferencia de calor entre el fluido térmico y el hormigón, como, por ejemplo, el acero. Los tubos del intercambiador de calor pueden ser de diversa geometría, siendo la más óptima en espiral (5 aletas – 9.13% de energía almacenada extra), pero debido a su excesivo coste (5 aletas – 382.80% de coste extra) se suele usar tubos lisos. Otro factor importante a tener en cuenta es la disposición de los tubos, esta debe de ser triangular para mejorar la distribución térmica.

Por último, en lo referente a la disposición del módulo de almacenamiento en una planta termosolar, decir que afecta de manera directa a la capacidad de almacenamiento. Esta se ve aumentada cuando se realiza una carga (190 MWh) o descarga (210 MWh) modular de forma separada o conjunta (280 MWh), además de verse las pérdidas reducidas. El inconveniente de la colocación de los módulos de forma modular es el incremento en los costes, ya que esta configuración necesitas de equipos auxiliares como bombas, tuberías, válvulas y aislante térmico. Aun así, se ha demostrado que la integración de un almacenamiento modular disminuye los costes globales a un 2 % - 3 %.

Todas estas investigaciones pudieron ser probadas por primera vez en el año 2001 cuando el Centro Aeroespacial Alemán (DLR) desarrollo el proyecto WESPE. Proyecto con el cual se pretendía obtener unos costes inferiores a los 20 €/kWh de capacidad térmica y 0.01 €/kWh<sub>e</sub>, a partir de una unidad de prueba de 350 kWh que trabajaría a una temperatura de 390 °C. El proyecto WESPE finalizó de manera exitosa, proporcionando grandes expectativas a este tipo de almacenamiento.

Multitud de investigaciones se fueron desarrollando para mejorar tanto la capacidad de almacenamiento como la temperatura de trabajo, llegando, en 2008, a la realización de un segundo proyecto, esta vez localizado en Stuttgart (Alemania), donde se probaron 252 módulos de almacenamiento de 474 kWh cada uno trabajando a una temperatura de 400 °C. Obteniendo resultados similares a los teóricos.

En el año 2014 se incorporó a la investigación de sistemas de almacenamiento térmico la empresa EnergyNest, a través de un proyecto desarrollado en la plataforma solar del instituto Masdar (Abu Dabi). En este proyecto, la empresa probó 4 módulos de 250 kWh cada uno trabajando a una temperatura de 393 °C. Los módulos fueron elaborados con su propia mezcla de hormigón, "Heatcrete®". A la finalización del proyecto se concluyó que la nueva mezcla de hormigón podía ser implantada a gran escala a principios del 2015.

## 8 BIBLIOGRAFÍA

- [**A. Gil et al., 2010**]. Antoni Gil, Marc Medrano, Ingrid Martorell, Ana Lázaro, Pablo Dolado, Belén Zalba, Luisa F. Cabeza, “State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1 – Concepts, materials and modellization”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010.
- [**Almagro, 2012**]. David Almagro, José Julio Guerra, “Almacenamiento Térmico en Aplicaciones Solares de Concentración de Alta Temperatura”, Proyecto fin de carrera, 2012.
- [**Andini, 2008**]. S.Andini, R. Cioffi, F. Colangelo, T. Grieco, F. Montagnaro, L. Santoto, “Coal fly ash as raw material for the manufacture of geopolymer-based products”, Waste Management 28, 2008.
- [**Bae, 2010**]. Sung Bae Kim, Na Hyun Yi, Hyun Young Kim, Jang-Ho Jay Kim, Young-Chul Song, “Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete”, Cement & Concrete Composites, 2010.
- [**Bergan, 2014**]. Pål G. Bergan, Christopher J. Greiner, “A new type of large scale thermal energy storage”, Renewable Energy Research Conference, RERC 2014, Energy Procedia 58, 2014.
- [**Daniel, 2008**]. Daniel L.Y. Kong, Jay G. Sanjayan, “Damage behavior of geopolymer composites exposed to elevated temperatures”, Cement & Concrete Composites 30, 2008.
- [**E.F. Camacho et al. 2012**]. E.F. Camacho et al., “Control of Solar Energy Systems”, Advances in Industrial Control, 2012.
- [**Fernández, 2001**]. A. Inés Fernández, Mónica Martínez, M. Segarra, Luisa F. Cabeza, “Selection of materials with potential in thermal energy storage”, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 2001.
- [**Ferone, 2014**]. Claudio Ferone, Francesco Colangelo, Domenico Frattini, Giuseppina Roviello, Raffaele Cioffi, Rosa di Maggio, “Finite Element Method Modeling of Sensible Heat Thermal Energy Storage with Innovative Concretes and Comparative Analysis with Literature Benchmarks”, Energies, 2014.
- [**Flatt, 2012**]. Robert J. Flatt, Nicolas Roussel, Christopher R. Cheeseman, “Concrete: An eco material that needs to be improved”, Journal of the European Ceramic Society, 2012.
- [**IEA, 2016**]. IEA (International Energy Agency), “Tracking Clean Energy Progress”, 2016.
- [**Jian, 2015**]. Y. Jian, F. Bai, Q. Falcoz, Z. Wang, “Control strategy of the module concrete thermal energy storage for parabolic trough power plants”, International Conference On Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems, SolarPACES 2014, 2015.
- [**Kuravi, 2013**]. Sarada Kuravi, Jamie Trahan, D. Yogi Goswami, Muhammad M. Rahman, Elias K. Stefanakos, “Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants”, Progress in Energy and Combustion Science, 2013.
- [**Laing, 2006**]. Doerte Laing, Wolf-Dieter Steinmann, Rainer Tammer, Christoph Richter, “Solid Media Thermal Storage for Parabolic Trough Power Plants”, Solar Energy 80, 2006.
- [**Laing, 2008**]. Doerte Laing, Dorothea Lehmann, German Aerospace Center, “Concrete Storage for Solar Thermal Power Plants and Industrial Process Heat”, IRES III 2008, 3rd International Renewables Energy Storage Conference, 2008.

- [**Laing, 2008**]. Doerte Laing, Wolf-Dieter Steinmann, Michael FiB, Rainer Tamme, Thomas Brand, Carsten Bahl, “Solid Media Thermal Storage Development and Analysis of Modular Storage Operation Concepts for Parabolic Trough Power Plants”, *Journal of Solar Energy Engineering*, 2008.
- [**Laing, 2010**]. Doerte Laing, Wolf-Dieter Steinmann, P. Viebahn, F. Gräter, C. Bahl, “Economic Analysis and Life Cycle Assessment of Concrete Thermal Energy Storage for Parabolic Trough Power Plants”, *Journal of Solar Energy Engineering*, 2010.
- [**Matthieu, 2015**]. Matthieu Martins, Uver Villalobos, Thomas Delclos, Peter Armstrong, Pal G. Bergan, and Nicolas Calvet, “New concentrating solar power facility for testing high temperature concrete thermal energy storage”, *The 7<sup>th</sup> International Conference on Applied Energy – ICAE2015*, 2015.
- [**Ozger, 2013**]. O.B. Ozger, F. Girardi, G.M. Giannuzzi, V.A. Salomoni, C.E. Majorana, L. Fambri, N. Baldassino, R. Di Maggio, “Effect of nylon fibres on mechanical and thermal properties of hardened concrete for energy storage system”, *Materials and Design*, 2013.
- [**Pacco,2010**]. Pacco Ramírez Karina, “La energía solar fotovoltaica y sus aplicaciones”, 2010.
- [**Panneer, 2012**]. Dr. R. Panneer Selvan, Dr. Micah Hale, Matt Strasser, “Development and Performance Evaluation of High Temperature Concrete for Thermal Energy Storage for Solar Power Generation”, United States, <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/1072014>, 2013.
- [**REN21, 2015**]. REN21 (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century), “Renewables 2015. Global Status Report”, 2015.
- [**Tamme, 2003**]. Rainer Tamme, Doerte Laing, Wolf-Dieter Steinmann, “Advanced Thermal Energy Storage Technology For Parabolic Trough”, *International Solar Energy Conferencia*, 2003.
- [**Tamme, 2006**]. Rainer Tamme, Doerte Laing, Hans Müller-Steinhagen, Wolf-Dieter Steinmann, “High Temperature Heat Storage for Industrial Process Heat and Power Generation”, *Energieautonomie durch Speicherung Erneuerbarer Energien*, 2006.
- [**William B.Stine et al., 2001**]. William B. Stine, Michael Geyer, “Power from the sun”, 2001
- [**Yuan, 2012**]. Hui-Wen Yuan, Chun-Hua Lu, Zhong-Zi Xu, Ya-Ru Ni, Xiang-Hui Lan, “Mechanical and thermal properties of cement composite graphite for solar thermal storage materials”, *Solar Energy*, 2012.
- [**Zabalza, 2011**]. Ignacio Zabalza Bribián, Antonio Valero Capilla, Alfonso Aranda Usón, “Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potencial”, *Buildind and Environment* 46, 2011.