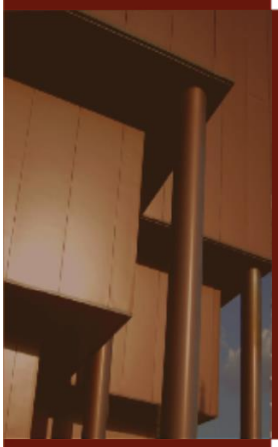
Trabajo Fin de Máster
Máster en Ingeniería Industrial

Análisis del almacenamiento de energía en materiales sólidos en centrales termosolares

Autor: Carlos Fernández-Figueroa Pajares
Tutor: Jose Julio Guerra Macho



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

Sevilla, 2020

Trabajo Fin de Máster
Máster en Ingeniería Industrial

Análisis del almacenamiento de energía en materiales sólidos en centrales termosolares

Autor:
Carlos Fernández-Figueroa Pajares

Tutor:
Jose Julio Guerra Macho
Catedrático de Universidad

Dpto. de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2020

Autor: Carlos Fernández-Figueroa Pajares

Tutor: Jose Julio Guerra Macho

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

A mi familia

A mis maestros

Resumen

El almacenamiento de energía en sólidos de hormigón es una tecnología en desarrollo y actualmente solo existe en todo el mundo tres plantas termosolares comerciales que hayan adoptado esta tecnología. En este trabajo se realiza un estado del arte de los sistemas de almacenamiento de energía térmica basados en hormigón. Se hace un estudio bibliográfico incluyendo estudios relevantes hasta la fecha sobre este material dedicado a este fin. Entre los diferentes estudios comparados destaca una comparativa del impacto ambiental con otras tecnologías, las propiedades del hormigón a altas temperaturas, comparativas de diferentes mezclas y como afectan los agregados en el rendimiento de estas, exposición de instalaciones de prueba reales y diferentes modelos numéricos simplificados y no simplificados encontrados en la literatura.

Abstract

Energy storage in concrete solids is a developing technology and there are currently only three commercial solar thermal plants worldwide that have adopted this technology. In this work a state of the art of concrete-based thermal energy storage systems is carried out. A bibliographic study is made including relevant studies to date on this material dedicated to this purpose. Among the different compared studies, a comparison of the impact with other technologies, the properties of concrete at high temperatures, comparisons of different mixtures and how the aggregates in their performance stand out, exposition of real test facilities and different simplified and non-simplified numerical models found in literature.

Tabla de contenido

Agradecimientos vii

Resumen ix

Abstract ix

Índice xi

Índice de Tablas xiii

Índice de Figuras xiv

Notación xvi

1. Introducción 1

1.1. Análisis bibliométrico 2

1.2. Análisis bibliométrico de las publicaciones sobre hormigón 5

1.3. Estructura y contenido 6

2. Centrales termosolares 7

2.1. Tipos de centrales termosolares 7

2.1.1. Colectores de cilindro parabólico 7

2.1.2. Colectores de disco parabólico 8

2.1.3. Sistemas de receptor central 9

2.1.4. Concentradores lineales Fresnel 10

2.2. Sistemas de almacenamiento de energía 11

2.2.1. Sistemas de almacenamiento de calor latente 11

2.2.2. Almacenamiento termoquímico 12

2.2.3. Almacenamiento de calor sensible 13

2.2.3.1. Sensible en estado gas 13

2.2.3.2. Sensible en estado líquido 13

2.2.3.3. Sensible en estado solido 15

2.3. Análisis de los tipos de centrales termosolares actuales 17

3. Almacenamiento de energía en hormigón 24

3.1. Evaluación comparativa del ciclo de vida e impacto ambiental 25

3.2. Propiedades del hormigón hasta 1000ºC 29

3.2.1. Propiedades térmicas 29

3.2.1.1. Conductividad térmica 29

3.2.1.2. Calor específico 30

3.2.1.3. Pérdida de masa 30

3.2.2. Propiedades mecánicas 31

3.2.2.1. Resistencia a compresión 31

3.2.2.2. Resistencia a tracción 32

3.2.2.3. Módulo de elasticidad 33

3.2.2.4. Tensión deformación 34
3.2.3. Deformación 35
3.2.3.1. Expansión térmica 35
3.2.4. Descamación inducida por fuego 35

3.3. Evaluación comparativa diferentes mezclas de hormigón 37
3.3.1. Comparativa tres mezclas de hormigón con aletas a 180 ºC 37
3.3.2. Comparativa de 7 mezclas de hormigón 38
3.3.3. Comparativa 7 mezclas de hormigón como TES 40
3.3.3.1. Efectos cíclicos sobre la resistencia residual 40
3.3.3.2. Efectos cíclicos sobre el peso unitario 41
3.3.3.3. Efectos cíclicos en la conductividad térmica 41
3.3.3.4. Efectos cíclicos en el calor específico 42
3.3.3.5. Efectividad de las mezclas como TES 42
3.3.4. Mezclas para sales 43

3.4. Aplicaciones alternativas 46

3.5. Configuraciones 47
3.5.1. Efecto de las aletas 47
3.5.2. Configuración de los módulos 48

3.6. Optimización de costos 49
3.6.1. Optimización de los parámetros 50
3.6.2. Optimización de los costos 53

3.7. Pruebas experimentales 55
3.7.1. Primeras pruebas 55
3.7.2. Pruebas más recientes 57
3.7.2.1. Evaluación del rendimiento a lo largo del tiempo 59

3.8. Modelos numéricos 60
3.8.1. Método de capacitancia concentrada 60
3.8.1.1. Aceite 0-D 60
3.8.1.2. Aceite 1-D 63
3.8.2. Método de elementos finitos 65
3.8.2.1. Aire 3-D y 1-D 65
3.8.2.1.1. Variación de la carga en función del tiempo y la temperatura de entrada 67
3.8.2.1.2. Tiempo de carga y descarga en función de la velocidad de entrada del aire 68
3.8.2.1.3. Variación de la temperatura en función del tiempo y zona del módulo 68
3.8.2.1.4. Tasa de carga y descarga de energía de energía térmica 69
3.8.2.1.5. Consecuencias de los experimentos en el hormigón 71
3.8.2.2. Aceite 3-D 71

4. Conclusión 73

Anexos 75

Referencias 77

Glosario 79

Índice de Tablas

Tabla 1. Resultados Scopus 2018. 4
Tabla 2.Materiales usados en almacenamiento en partículas sólidas. 16
Tabla 3. Centrales termosolares 1. 17
Tabla 4. Centrales termosolares 2. 18
Tabla 5.Centrales termosolares 3. 19
Tabla 6. Centrales termosolares 4. 20
Tabla 7. Características de un módulo de hormigón. Plataforma Solar de Almería. 25
Tabla 8. Características TES sales fundidas. Andasol 1. 26
Tabla 9. Características TES en PCM. 26
Tabla 10.Rango de temperatura en cada TES. 27
Tabla 11. Impactos globales de cada TES. 28
Tabla 12. Composición 7 mezclas de hormigón. 38
Tabla 13. Comparación 7 mezclas de hormigón. 39
Tabla 14. Composición 7 mezclas de hormigón para TES. 40
Tabla 15. Comparativa general 4 mezclas de hormigón para TES. 42
Tabla 16. Comparativa general 3 mezclas de hormigón para TES. 43
Tabla 17. Composición de 26 muestras de hormigón. 44
Tabla 18. Características de 26 muestras de hormigón. 45
Tabla 19. Coste por kWh según el diámetro de tubos. 53
Tabla 20. Coste por kWh según temperatura mínima adimensional. 54
Tabla 21. Costes según diferentes energías de descarga. 54
Tabla 22.Comparativa propiedades diferentes hormigones. 59
Tabla 23. Resumen resulados usando aire como HTF. 70
Tabla 24. Características materiales de prueba. 71
Tabla 25. Energía almacenada y porcentage de carga 3 materiales sólidos. 72

Índice de Figuras

Figura 1. Torre de receptor central 1
Figura 2. Número de publicaciones por tipo y año 1998-2017 2
Figura 3. Número de publicaciones CSP por país. 3
Figura 4. Número de publicaciones TES por año. 3
Figura 5. Número de publicaciones TES por país. 4
Figura 6. Nivel TRL frente a año de publicación entre 2008-2018 5
Figura 7. Número de publicaciones sobre hormigón como TES 5
Figura 8.Esquema básico central cilindro-parabólica 7
Figura 9. Central cilindro-parabólico, Andasol-1 (Granada). 8
Figura 10. Planta solar de disco parabólico. 9
Figura 11. Esquema planta termosolar de torre central 9
Figura 12. Planta solar Gemasolar en Fuentes de Andalucía 10
Figura 13. Esquema planta termosolar Fresnel. 10
Figura 14. Módulo Fresnel planta Dhursar (India). 11
Figura 15. Tipos de TES. 11
Figura 16. Distribución de potencia instalada por tecnología. 22
Figura 17. Cantidad de plantas con TES por tecnología. 22
Figura 18. Potencia de plantas termosolares por país. 23
Figura 19. Estado general de las plantas termosolares construidas. 23
Figura 20. Capacidad de almacenamiento de cada tecnología TES. 27
Figura 21. Impactos globales de cada TES. 28
Figura 22. Conductividad térmica hormigón a altas temperaturas. 29
Figura 23.. Calor específico del hormigón a altas temperaturas. 30
Figura 24. Pérdida de masa del hormigón a altas temperaturas. 31
Figura 25. Resistencia a compresión de NSC a altas temperaturas. 32
Figura 26.Resistencia a compresión de HSC a altas temperaturas. 32
Figura 27. Resistencia a tracción del hormigón a altas temperaturas. 33
Figura 28. Módulo de elasticidad del hormigón a altas temperaturas. 33
Figura 29. Curva tensión-deformación NSC. 34
Figura 30. Curva tensión deformación HSC. 34
Figura 31. Expansión térmica en función de la temperatura. 35
Figura 32. Desprendimiento en dos columnas de hormigón 37
Figura 33. Resistencia/número de ciclos de 7 mezclas de hormigón 41
Figura 28. Curva temperatura entalpía almacenamiento PCM-Hormigón. 46
Figura 29. Esquema almacenamiento PCM-Hormigón. 47
Figura 31. Influencia de las aletas en la temperatura y la energía térmica almacenada 48
Figura 32. Energía/tiempo de descarga según la velocidad 49
Figura 33. Influencia de la relación de diámetro en diferentes parámetros. 50
Figura 34. Influencia de la longitud del módulo en diferentes parámetros. 51
Figura 35. Influencia de la velocidad en los tubos sobre diferentes parámetros. 52
Figura 36. División de costes según el diámetro. 53
Figura 37. Distribución de costes para diferentes capacidades de almacenamiento. 55
Figura 38. Módulo sin aislamiento térmico. 55
Figura 39. Temperaturas módulo de hormigón en ciclos de 10 horas. 56
Figura 40. Pérdidas de energía en función de la temperatura. 56
Figura 41. Propuesta almacenamiento térmico 1100MW. 57
Figura 42. Energía solar y almacenada mensual y anual. 57
Figura 43. Coeficientes de expansión HEATCRETE y acero al carbono ASME A-106 Gr. B 58
Figura 44. Conservación de las propiedades de HEATCRETE con la temperatura 58
Figura 45. Respuesta entrada/salida módulo HEATCRETE en diferentes años. 59
Figura 46. Comparación rendimiento HEATCRETE tras 6000 horas de funcionamiento. 60
Figura 47. Dibujo esquemático bloque de hormigón. 61

Figura 48. Mallado bloque de hormigón *62*
Figura 49. Temperatura aceite experimental y simulada *62*
Figura 50. Resultados correlación Gnielinski. *63*
Figura 51. Resultados modelo 1-D aceite *64*
Figura 52. Alcance del estado estacionario del experimento *64*
Figura 53. Esquema ensayo CTES. *65*
Figura 54. Comparación modelo 3-D y 1-D. *66*
Figura 55. Porcentajes de carga/ temperatura de entrada. *67*
Figura 56. Porcentajes de descarga/ temperatura de entrada. *67*
Figura 57. Influencia de la velocidad en la temperatura del módulo. *68*
Figura 58.Temperatura según longitud y distancia radial a lo largo del tiempo en carga. *68*
Figura 59. Temperatura según longitud y distancia radial a lo largo del tiempo en descarga *69*
Figura 60. Energía cargada y descargada según temperatura de entrada *69*
Figura 61. Disminución de la potencia a lo largo del tiempo. *70*
Figura 62. Grietas tras 36 meses de pruebas experimentales. *71*

Notación

Btu: British Thermal Unit.

ft: pié

J: Julio

Kg: Kilogramo.

ksi: 1000 libras por $pulgada^2$

lb: libra

m: metro

mm: milímetro

ºC: Grado centígrado

ºF: Grado Fahrenheit

pulg.: pulgada

Yd: yarda

1. Introducción

La energía es uno de los contribuyentes principales para el progreso de varios sectores como el servicio público, la industria y el transporte, y es el principal factor para el crecimiento monetario de cualquier nación. Los factores principales para exceder la demanda energética son el crecimiento de la población mundial y la mejora de los niveles de vida de los ciudadanos. El uso de las energías renovables se ha hecho crucial para disminuir el consumo de combustibles fósiles, así como la producción del dióxido de carbono, responsable en parte del efecto de los gases de efecto invernadero. Dentro de las diferentes alterativas para aprovechar las energías renovables, la energía solar se considera un recurso cada vez más prometedor para combatir el calentamiento global. Esto se debe a la cantidad de irradiación solar que incide sobre la tierra. El Sol libera una gran cantidad de energía de la cual 174 PW llega a la atmósfera, cuando esta llega a la superficie de la tierra, la atmósfera la ha reducido un 6% por reflexión y otro 16% por absorción y, las nubes, un 20% por reflexión y un 3% por absorción. A pesar de que a la tierra y los océanos llega solo un 51% de esta energía, la cantidad de 89PW de energía incidente es enorme y debido a su baja densidad e intermitencia, debe ser recolectada y almacenada para posteriormente ser utilizada.

Uno de los medios para aprovechar esta energía es mediante la tecnología termosolar y se prevé que esta suministre un 6% de la demanda eléctrica global para 2030 y un 12% para 2050. Los sistemas de captación solar y de almacenamiento de energía son los dos subsistemas principales en las centrales termosolares. Los captadores deberían tener un buen rendimiento óptico, absorbiendo la mayor cantidad de energía posible, mientras que, los sistemas de almacenamiento de energía térmica buscan tener un pequeño volumen de almacenamiento, bajo costo de construcción, buena transferencia de calor y alta durabilidad a largo plazo.

Combinando las diferentes tecnologías de energía solar concentrada y almacenamiento de energía térmica, se puede recolectar la energía para ser utilizada en otro momento, resolviendo de esta manera el problema de la intermitencia de la luz solar. Los sistemas de almacenamiento de energía se cargan durante las horas de luz y se descargan durante la noche u horas de ausencia o escasez de luz. Está tecnología es, por tanto, capaz de solucionar el desajuste de energía existente entre as horas de oferta y demanda, mejorando el rendimiento, la fiabilidad del suministro y la flexibilidad de estos sistemas de energía.

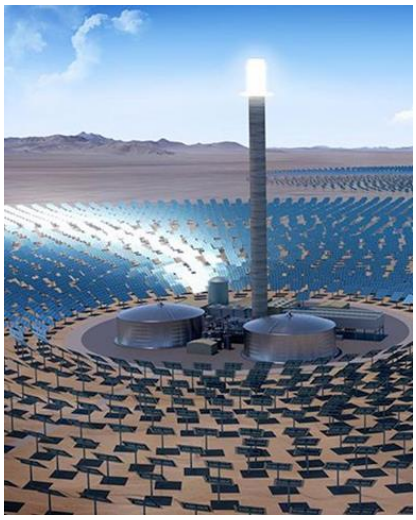


Figura 1. Torre de receptor central

1.1. Análisis bibliométrico

En este apartado se pretende cuantizar la cantidad de publicaciones existentes sobre el almacenamiento de energía térmica en cualquier tipo de medio, para así hacer una idea de la relevancia que tiene este tipo de tecnologías en la actualidad. Mediante un análisis de las publicaciones sobre las tecnologías de almacenamiento de energía, se determina la evolución de estas tecnologías actualmente. A través de la base de datos de este análisis se aprecia un elevado aumento de publicaciones acerca del almacenamiento de energía térmica en la última década, cogiendo algo de importancia a partir de 2005, esto se puede apreciar en la siguiente figura, en la que viene especificado según el tipo de almacenamiento:

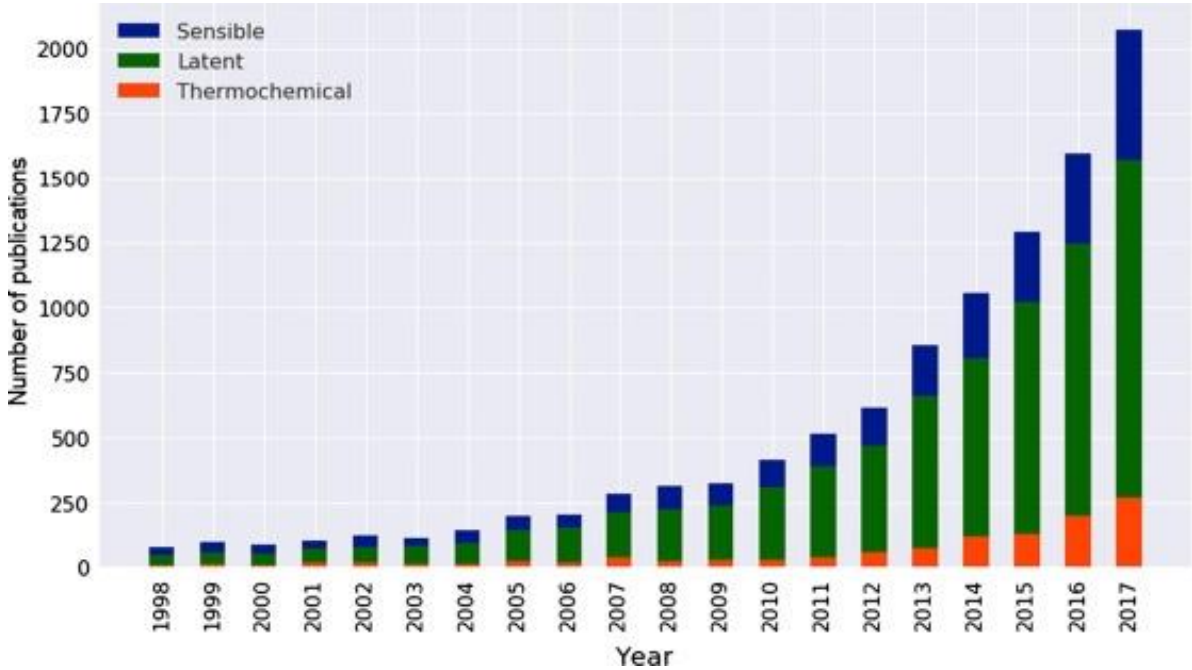


Figura 2. Número de publicaciones por tipo y año 1998-2017.

Se observa, por tanto, un increíble aumento en las publicaciones de almacenamiento térmico en el periodo 2013-2017 en los 3 tipos de almacenamiento, superando las 2000 publicaciones en el año 2017. También destaca una mayor cantidad de publicaciones sobre almacenamiento de calor latente, en verde, siendo del 61% del total, seguida de las de almacenamiento de calor sensible, en azul, 29%, y siendo las menos numerosas las de almacenamiento de calor termoquímico, en naranja, 10%.

También se estudió los países que más invierten en este tipo de tecnología, siendo los países que más publicaciones han sacado, China y EE. UU. siendo su número mucho mayor al de los demás países, en parte, debido al mayor tamaño de estos respecto de los demás países. La Unión Europea ha publicado en su conjunto más que cualquiera de estos países, llevando la cabeza Alemania, seguida de España, Francia, Inglaterra e Italia. La Unión Europea publicó aproximadamente 5500 publicaciones, teniendo un 50% más de publicaciones que el país con mayor número de estas, China, el cual publicó 3750 publicaciones hasta 2017, seguido de EE. UU., el cual llegó a las 3000 publicaciones. El tercer país en la lista es Japón, cuyo número de publicaciones era tres veces menor que las de EE. UU. En los siguientes países de la lista no se encontró tanta diferencia entre el número de publicaciones, siendo los más destacados por orden, Alemania, España, Francia, Inglaterra, India, Canadá, Italia y Australia.

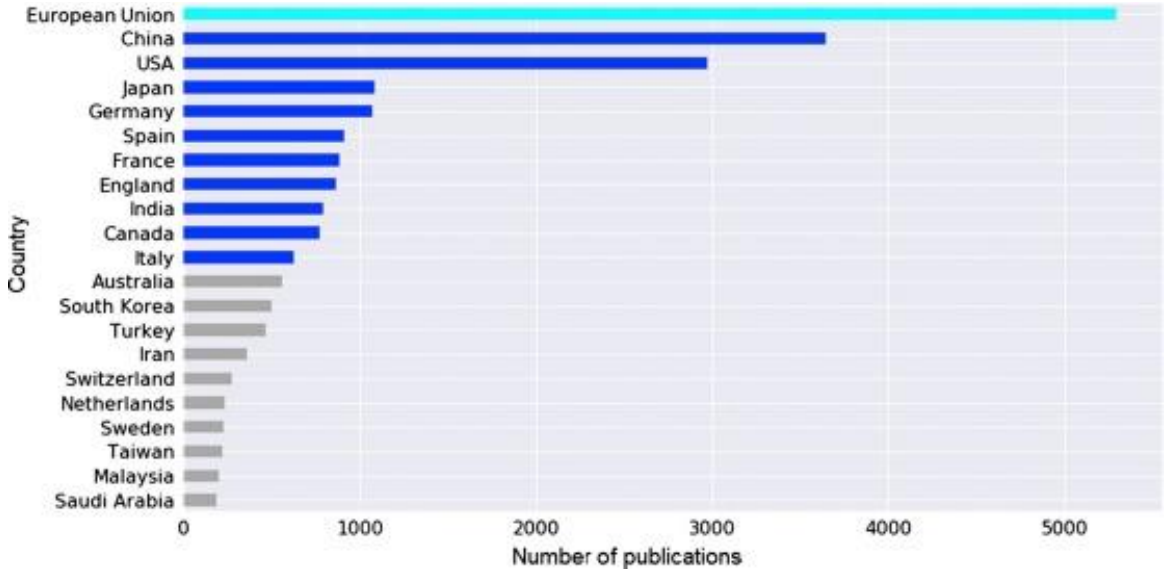


Figura 3. Número de publicaciones CSP por país.

Al basarse el presente trabajo en una tecnología de almacenamiento de calor sensible, nos centraremos en esta en la siguiente figura. Esta clase de tecnología experimentó un incremento del 43% de 2016 a 2017, lo que la destaca como la tecnología más prometedora con respecto a las otras dos. La Unión Europea encabeza el número de publicaciones, siendo estas de 1000 y el 200% de publicaciones de China y superando este por poco a EE.UU. Japón y Alemania tuvieron un alto número de publicaciones, siente este poco menos de la mitad de China, y destacándose Alemania como el país europeo con mayor número de estas. También destaca el alto crecimiento de nuevas publicaciones en China en los últimos años, lo cual se debe a un aumento en su desarrollo económico.

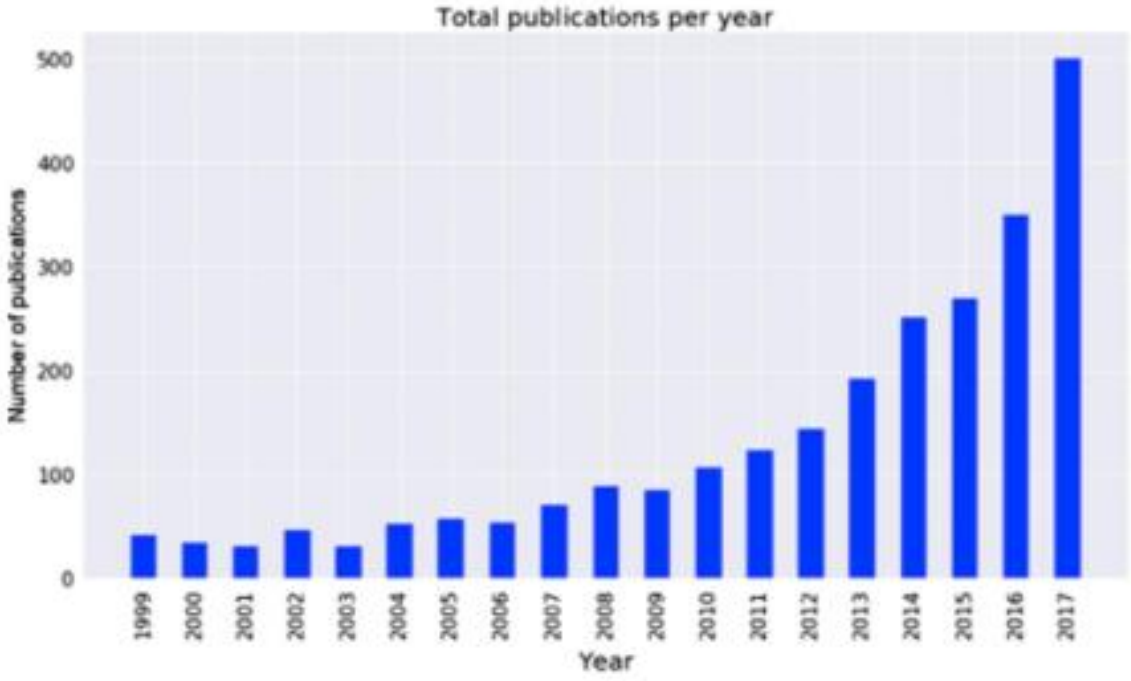


Figura 4. Número de publicaciones TES por año.

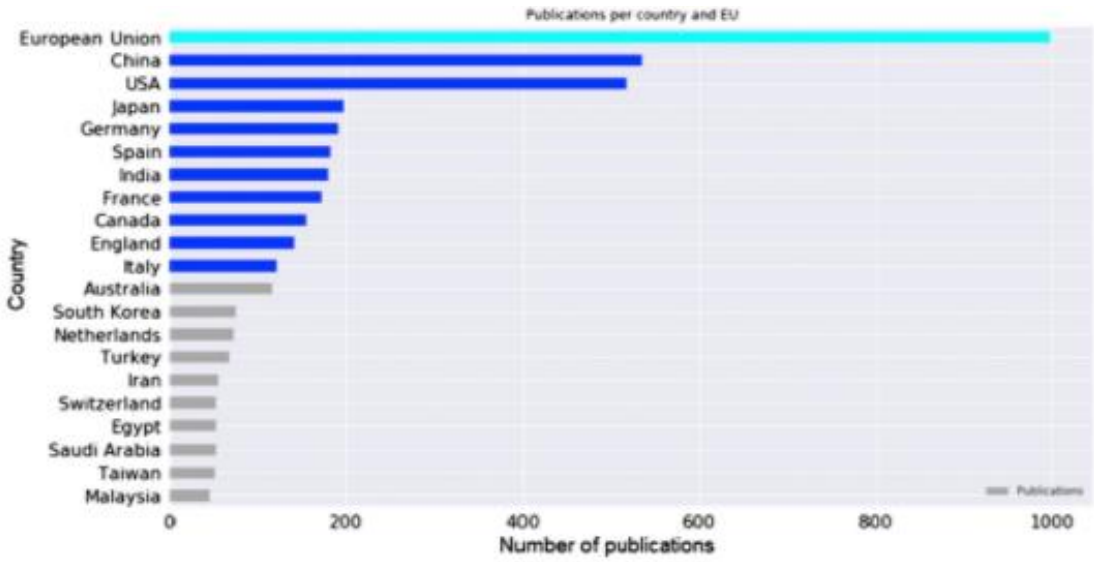


Figura 5. Número de publicaciones TES por país.

Se analiza en 2018 el estado actual y las tendencias futras de estas tecnologías. Utilizando la base de datos de Scopus se evaluó la información relativa a publicaciones, año de publicación y tipo de publicación. Las patentes fueron comparadas con la información de The United States Patent and Trademark Office. Destaca una mayor investigación en almacenamiento en sales fundidas, siendo esta la tecnología por excelencia en plantas operativas. También fue importante hasta ese año las publicaciones en PCM, Vapor y termoquímico. Con respecto a las patentes totales, son de destacar el número de estas sobre las sales fundidas y el hormigón.

Medios de TES	Publicaciones	Artículos de revistas	Papeles de conferencias	Otros	Patentes
Sales fundidas	127	74	52	6	132
Cambio de fase	74	51	19	4	31
Vapor	57	31	21	5	164
Termoquímico	50	32	13	5	7
Lecho empacado	37	25	11	1	8
Nanofluidos	18	10	7	1	6
Patículas sólidas	13	3	8	2	21
Hormigón	11	4	6	1	43
Metales líquidos	7	5	2	0	25

Tabla 1. Resultados Scopus 2018.

La figura 6 muestra una relación entre el nivel de TRL, relacionado con la tasa de publicación y el año de publicación entre 2008 y 2018. TRL es la tasa de madurez tecnológica, tiene una escala del 1 al 9, y para determinarla se evalúan los conceptos de la tecnología, los requisitos de esta y las capacidades demostradas de esta. La UE ha definido los niveles de TRL como:

- TRL 1: Principios básicos observados.
- TRL 2: Concepto de tecnología formulado.
- TRL 3: Prueba experimental de concepto.
- TRL 4: Tecnología validada en laboratorio.
- TRL5: Tecnología validada en un entorno industrialmente relevante.
- TRL 6: Tecnología demostrada en un entorno industrialmente relevante.

- TRL 7: Demostración del prototipo en un entorno operativo.
- TRL 8: Sistema completo y calificado.
- TRL 9: Sistema real probado en el entorno operativo.

Se observa una clara superioridad en el número de publicaciones de almacenamiento de calor sensible sobre el latente y el termoquímico. La enorme brecha observada en el sector inferior y superior separa las tecnologías comerciales y no comerciales siendo las 4 de la parte superior, comerciales. Destacan las sales fundidas al ser la tecnología usada por excelencia, seguidas del hormigón, vapor y cama empacada, las cuales han sido validadas, pero aún no se ha normalizado su comercialización. Los nano fluidos y PCM han sido probados, pero aun les queda mucho desarrollo para su comercialización. El almacenamiento termoquímico, las partículas sólidas y los metales líquidos están en las primeras fases de desarrollo.

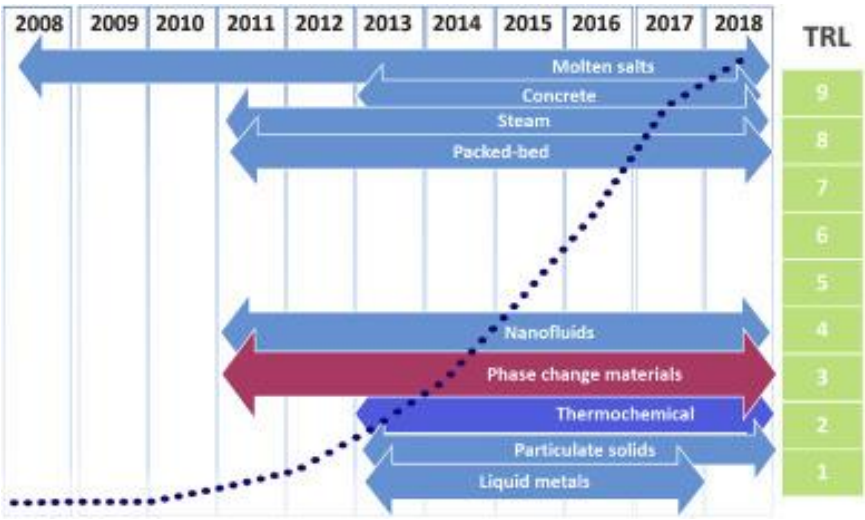


Figura 6. Nivel TRL frente a año de publicación entre 2008-2018

1.2. Análisis bibliométrico de las publicaciones sobre hormigón

En este apartado se hace una revisión bibliográfica del hormigón usado como TES, para ellos mediante una sencilla búsqueda en ScienceDirect y excluyendo aquellos artículos referidos al hormigón para la construcción se observan un total de 38 publicaciones, siendo 2 de ellos capítulos de libros, 2 artículos de revisión y 34 artículos de investigación. Se ha venido observando una tendencia ascendente el número de estas hasta su pico en 2018.

Figura 7. Número de publicaciones sobre hormigón como TES

1.3. Estructura y contenido

El presente documento tiene como objetivo, realizar una revisión bibliográfica sobre el almacenamiento de energía térmica en hormigón aplicado en centrales termosolares. Anteriormente se ha hecho una revisión bibliográfica de las principales tecnologías de almacenamiento térmico, evaluando los países más implicados en el desarrollo del almacenamiento térmico, las tecnologías más investigadas y el grado de madurez de cada tecnología actualmente.

En el siguiente apartado se realiza un análisis de todas las tecnologías actuales para concentración de energía térmica con la intención de aportar una idea de como se capta la energía térmica que luego pasará al bloque de almacenamiento. Además, se analizarán las tecnologías de almacenamiento térmico ya sean comerciales o estén en desarrollo, dividiéndolas según la forma de almacenamiento de calor, sensible, latente o termoquímico.

El tercer bloque se centra en la tecnología de almacenamiento objeto de este documento, el hormigón. Aquí se pretende evaluar los principales requisitos que tiene una tecnología para que esta sea aplicada en una planta termosolar. El bloque desarrolla el impacto ambiental de esta tecnología comparada con otras comerciales actualmente y el desempeño a altas temperaturas del hormigón, teniendo en cuenta los diferentes problemas que pueden aparecer al calentarlo, dándoles solución y analizando sus características. A lo largo del bloque también se desarrolla una comparativa de diferentes mezclas de hormigón cuyas composiciones difieren unas de otras, con el objetivo de acercarnos a una composición de hormigón óptima para aplicar en una planta termosolar. Posteriormente, se hace un análisis básico de la repercusión de los bloques de hormigón, según utilicen aletas y según su disposición. En el siguiente punto se analiza la variación de algunos parámetros en un bloque de hormigón y se hace un análisis de la optimización de los costos de este, con la finalidad de cuantificar el porcentaje que implica cada parte de la tecnología en el coste total del almacenamiento. Se analiza también la opción de combinar la tecnología con materiales de cambio de fase, para obtener beneficios de las dos tecnologías y evaluar el futuro de esta combinación. También se hace en este bloque un análisis de los principales ensayos a escala real de bloques de hormigón usados para almacenamiento de energía térmica, siendo el ultimo el más importante, debido a que se muestra completamente viable. Por último, se desarrollan diferentes modelos encontrados en la bibliografía, algunos simplificados y otros no los cuales usan aire o aceite como HTF, lo que muestra la exactitud de la predicción de respuesta de esta tecnología.

En el último apartado, se hace una valoración de las conclusiones sacadas en cada uno de los apartados, determinando la importancia de estos y se hace una previsión de futuro de esta tecnología para los próximos años.

2. Centrales termosolares

Entre las distintas tecnologías de captación de energía, las centrales termosolares destacan por su bajo costo, potencial de ampliación de las plantas y alta eficiencia. Uno de los factores que la hace aún más atractiva, es la integración en estas de sistemas de almacenamiento de energía térmica eficiente, superando así su carácter intermitente. Siendo el sistema de almacenamiento necesario para la gran mayoría de las nuevas plantas termosolares. En este capítulo se hará un resumen de los principales sistemas de captación de energía y los principales sistemas de almacenamiento de energía térmica.

2.1. Tipos de centrales termosolares

Los sistemas de captación solar los encargados de convertir la irradiación solar en energía térmica del fluido de trabajo. En las aplicaciones térmicas solares, los colectores solares absorben la irradiación solar para transferirla posteriormente a un fluido de trabajo, generalmente aceite, agua o aceite. En este capítulo se hará un resumen de los principales sistemas existentes, explicando su funcionamiento, ventajas y su presencia internacional.

2.1.1. Colectores de cilindro parabólico

Este sistema de captación solar térmica concentra la energía solar en un receptor central lineal mediante espejos. Estos espejos tienen una forma cilindro-parabólica y el receptor central donde se refleja la energía solar. El receptor central, será un tubo de doble capa coloreado para lograr la máxima absorción y por el que circula un fluido de transmisión de calor y al que se le hace vacío para evitar las pérdidas de energía. El sistema tiene un requisito de superficie de 4-6 $\frac{m^2}{MWh}$ y usa como HTF aceite sintético y agua/vapor, estando en desarrollo el uso de sales fundidas y aire.

Este tipo de plantas están formados por cientos de espejos con la misma orientación que tendrán movimiento en un eje, para así seguir el sol y aumentar la eficiencia del captador solar. Su orientación será este-oeste para captar una cantidad equilibrada de energía entre invierno y verano o norte-sur, si el objetivo fuese captar más energía durante verano.

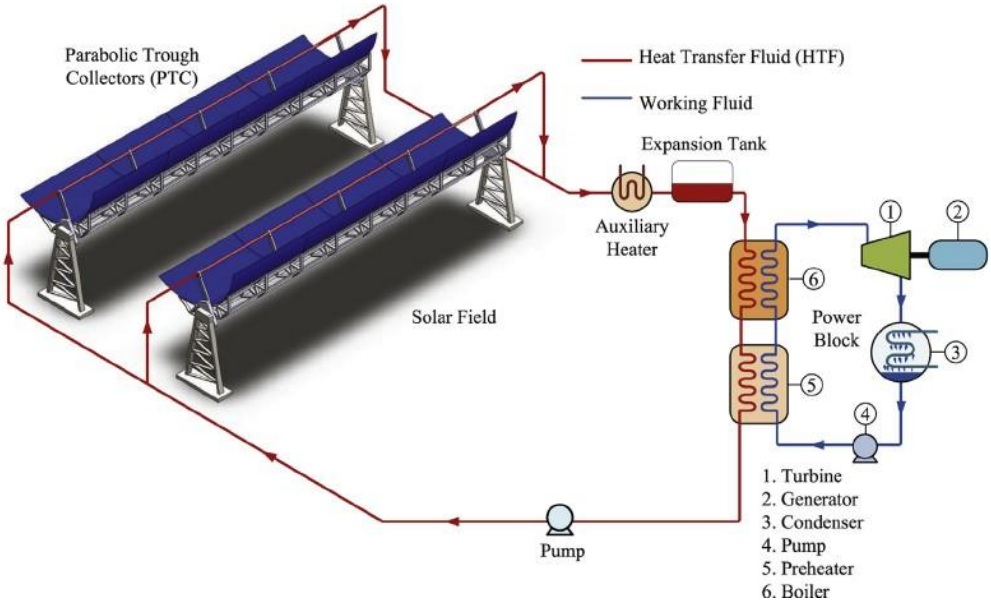


Figura 8.Esquema básico central cilindro-parabólica

El fluido caloportador puede ser aceite, que alcanza unos 400ºC, aceite sintético, que se calienta hasta unos 550ºC o vapor de agua a unos 500ºC,

Este fluido caliente es utilizado para convertir agua en vapor mediante un intercambiador de calor, para posteriormente usar este vapor en una turbina de vapor que proporciona electricidad. Tanto el fluido caloportador como el agua se reciclan y se usas nuevamente en el proceso.

Los sistemas de captación cilindro-parabólicos son la tecnología de captación más utilizada. El primero de estos sistemas se desarrolló en 1912 en Egipto, existiendo 80 de estas plantas de la actualidad en operación. La mayoría se ubican en España o Estados Unidos, mientras también existen 4 en Marruecos, 2 en Italia, 2 en Sudáfrica, 1 en Canadá, 4 plantas en India, 1 en Argelia, 1 en Egipto, 5 en Emiratos Árabes Unidos, 1 planta en Tailandia, 1 en Dinamarca.

Figura 9. Central cilindro-parabólico, Andasol-1 (Granada)

Actualmente hay 44 plantas en España con esta tecnología, siendo el primero en instalarse la planta Andasol-1 en Granada (2008), con una capacidad de 49,9 MW. Posteriormente, fueron construidas las plantas Helios I y II, siendo estas dos las más grandes de España con 260 hm2 de superficie utilizada cada una.

2.1.2. Colectores de disco parabólico

El funcionamiento de este tipo de sistemas se basa en hacer reflejar la radiación solar en un reflector parabólico hacia un foco receptor central. Los concentradores tendrán un sistema de seguimiento del sol en dos es para aumentar la eficiencia del sistema. Este receptor está fabricado generalmente de plata o aluminio y el diámetro del disco parabólico será de entre 5 y 10 m, también se le aplica un pequeño porcentaje de hierro para llegar a una reflectancia de entre 90-94%. El requisito de superficie es de 30-40 $\frac{m^2}{MWh}$ y usa como HTF aire, hidrógeno y helio.

Se coloca un motor Stirling/Brayton con un generador eléctrico para aprovechar este calor, alcanzando el fluido caloportador una temperatura de 700-750ºC y una presión de 200 bar.

La principal ventaja de esto sistemas es que tienen una eficiencia del 25-30%, esto se debe a que los espejos curvos siempre apuntan directamente al sol y no sufren pérdidas por este factor. Otro factor a tener en cuenta es que a diferencia de otros sistemas no necesita un terreno completamente nivelado para su construcción.

La única central de estas características operativa actualmente se encuentra en el Depósito del Ejército Tooele, en Utah. Esta planta usa helio como fluido de trabajo, tiene una capacidad instalada de 1.5 MW y consta de 429 antenas.

Figura 10. Planta solar de disco parabólico

2.1.3. Sistemas de receptor central

Este tipo de centrales emplean espejos planos para reflejar la radiación solar recibida en un receptor solar, generalmente de cerámicas o metales, situado en lo alto de una torre en el campo de heliostatos, los cuales tendrán movilidad para enfocar de manera correcta la radiación solar hacia el receptor. El fluido de trabajo caloportador a calentar en el receptor solar podrá ser sal fundida, sodio líquido, aire o agua/vapor y el sistema tiene un requisito de superficie de 8-12 $\frac{m^2}{MWh}$.

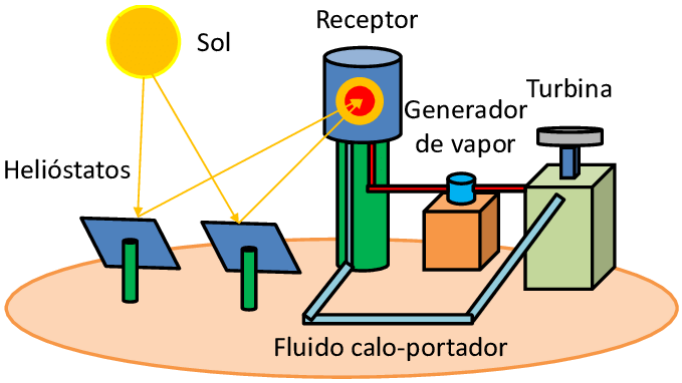


Figura 11. Esquema planta termosolar de torre central

En los sistemas que usan sales fundidas como fluido de trabajo, se bombean las sales a 290ºC y se calientan hasta 565ºC que posteriormente producirá vapor mediante un intercambiador de calor. Sin embargo, si se usa vapor como fluido de trabajo, este se calienta hasta 537ºC, y es este mismo vapor a alta presión el encargado de hacer girar la turbina de vapor mediante un ciclo Rankine y producir electricidad.

La primera planta de esta tecnología en desarrollarse en España fue Planta Solar 10 y tiene una capacidad de 11.02MW y una generación estimada de 23.400 $\frac{MWh}{año}$. Por otro lado, la planta más grande construida hasta la fecha se encuentra en Estados Unidos, Ivanpah Solar Electric Generating System, y tiene capacidad bruta de turbina de 392 MW y una generación eléctrica de 1.079.232 $\frac{MWh}{año}$. Existen actualmente 22 plantas funcionando en el mundo con esta tecnología en EE. UU., España, China, Chile, Australia, Sudáfrica, Marruecos, India, Alemania y Turquía.

Figura 12. Planta solar Gemasolar en Fuentes de Andalucía

2.1.4. Concentradores lineales Fresnel

Los receptores lineales Fresnel consisten en series de espejos lineales planos que reflejan la radiación solar para concentrarla en un receptor solar lineal encima de este. Los espejos tienen un sistema de seguimiento para redirigir de manera correcta los rayos del sol hasta el receptor lineal. El receptor lineal contiene una serie de tubos llenos de agua, la cual se evapora y se traslada a la turbina de vapor a alta presión donde se hace girar un generador que produce electricidad.

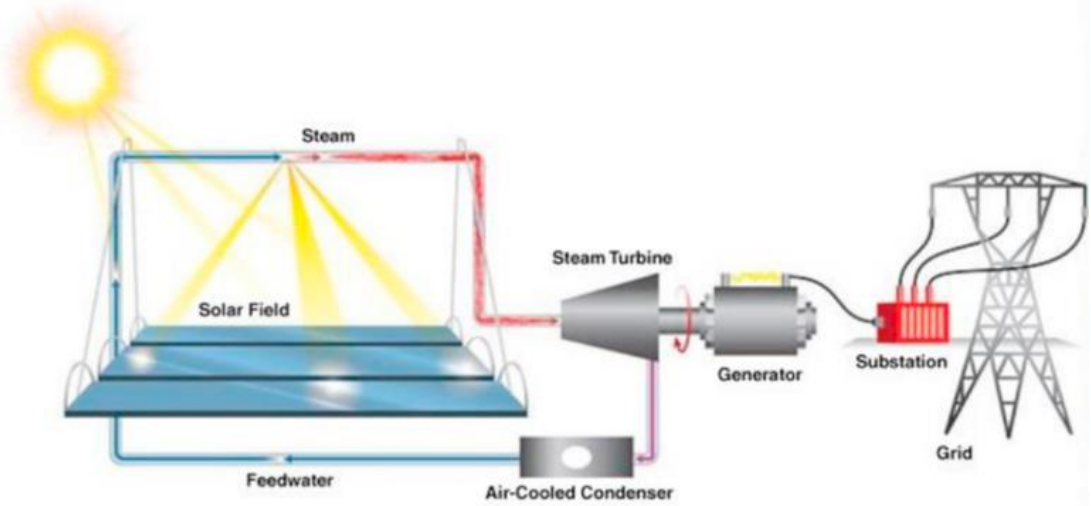


Figura 13. Esquema planta termosolar Fresnel

Este sistema tiene menor coste que el sistema cilindro-parabólico, pero a su vez, menor eficiencia, siendo esta entre un 8-10%. Actualmente hay únicamente 7 plantas de esta tecnología en operación y se puede destacar la planta Dhursar en la India de 125 MW construida en 2014 siendo esta la planta más grande del mundo con esta tecnología y la planta Puerto Errado 2 de 30 MW en España construida en 2014.

Figura 14. Módulo Fresnel planta Dhursar (India)

2.2. Sistemas de almacenamiento de energía

Los sistemas de almacenamiento de energía pueden recolectar energía durante las horas de sol y almacenarla para descargarla posteriormente, o bien,

El funcionamiento de una central solar térmica puede extenderse, más allá de las horas de radiación solar sin la necesidad de quemar combustibles fósiles. Un sistema de almacenamiento de energía no solo reduce los desajustes entre la oferta y la demanda energética, sino que también mejora el rendimiento y fiabilidad de los sistemas de energía.

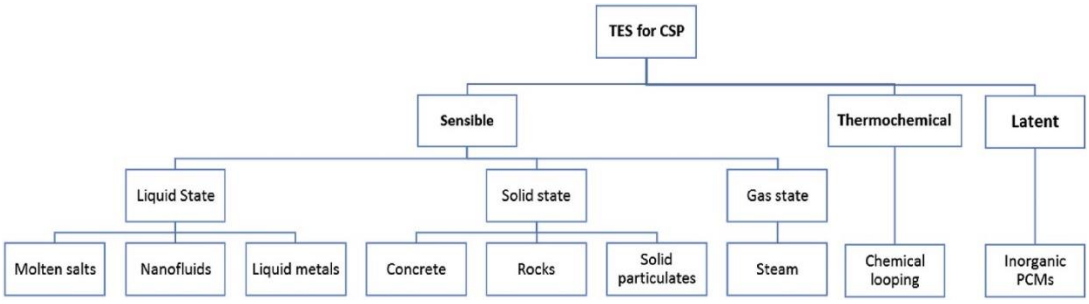


Figura 15. Tipos de TES

2.2.1. Sistemas de almacenamiento de calor latente

En los sistemas de almacenamiento de calor latente, la energía es almacenada mediante un proceso de cambio de fase a temperatura constante, sólido-líquido generalmente. Los materiales de cambio de fase pueden clasificarse en compuestos orgánicos, compuestos, inorgánicos y sus eutécticos y mezclas. Estos deberás tener su punto de fusión en el rango en el que se encuentra la temperatura operativa. Los compuestos orgánicos son comúnmente usados en sistemas de almacenamiento de energía a baja temperatura, por otro lado, los

compuestos inorgánicos se usas con altas temperaturas por encima de 400ºC, lo que los hace más adecuados para plantas termosolares. Algunos ejemplos de los compuestos inorgánicos más adecuados según su elevado punto de fusión y alta densidad de energía son los carbonatos, fluoruros y los cloruros. Sin embargo, esto tras un número de ciclos térmicos tienen un comportamiento de corrosión no deseado. Algunos de los sistemas estudiados han sido

- Sistema Sándwich combinado con almacenamiento sensible en hormigón y almacenamiento latente en nitratos
- Sistema cascada utilizando materiales de cambio de fase en serie con diferentes puntos de fusión y sistemas de termo clima
- La más utilizada, carcasa u tubo por ser la más económica

Los sistemas de almacenamiento de cambio de fase se consideran medios de baja complejidad y el proceso isotermo de transferencia de calor estará limitado por el campo solar y por los ciclos de energía térmica de Rankine.

Las principales desventajas de los almacenamientos de cambio de fase es la fusión incongruente que presentan, un subenfriamiento elevado y una naturaleza muy corrosiva. El subenfriamiento desajusta el sistema cambiando la temperatura de cambio de fase. Encapsulando el material de cambio de fase resuelve estos inconvenientes ya que reduce el subenfriamiento, disminuye la corrosión y aumentando la superficie, aumenta la transferencia de calor. Aunque lleva a otro tipo de problemas como la compatibilidad del material con la cápsula, fugas y aglomeración de las cápsulas, aparte de incrementar el coste de operación a gran escala. El cambio de volumen es también un problema comparado con los sistemas de almacenamiento de calor sensible. Para mejorar la capacidad de transferencia de calor, se ha propuesto una dispersión de partículas de grafito o partículas metálicas con alta conductividad térmica, aumentando la velocidad de carga y descarga y con ello la eficiencia energética.

Actualmente, este tipo de materiales está en investigación y desarrollo, no son comerciales debido a las dificultades de encapsulación a alta temperatura y al desafío de mejorar la transferencia de calor. Los desafíos técnicos han hecho que esta tecnología no haya podido desarrollarse como otras a pesar de la elevada contribución científica, aunque se espera un mejor sistema basado en materiales de cambio de fase para el futuro, necesitándose para ello un gran apoyo de la comunidad de investigación.

2.2.2. Almacenamiento termoquímico

Se basa en el almacenamiento de energía como energía química mediante la reacción de oxidación del combustible endotérmico en un proceso químico. Estos sistemas requieren comúnmente de temperaturas más altas para almacenar esa energía, y proporcionan temperaturas más altas al liberar esta energía. Los procesos químicos más comunes en esta tecnología son las reacciones de oxidación metal-metal y amoniaco. De entre todos los componentes, el calcio ha presentado el mayor potencial para almacenamiento de energía 4400 $\frac{MJ}{m^3}$, la mayor temperatura de funcionamiento (800-900ºC) y la la penalización de eficiencia más baja, alrededor del 6%. También tiene la capacidad de almacenar una fuente permanente de dióxido de carbono utilizando el exceso de electricidad producida en el campo de energía renovables, y de aumentar la potencia neta de salida del sistema integrado al 150%. A continuación, se enumeran las bases del almacenamiento termoquímico:

1. La energía solar se suministra al calcinador.
2. El calor se usa para calentar y descomponer $CaCo_3$ en partículas (piedra caliza/carbonato de calcio) en CaO (cal) y CO_2 (dióxido de carbono).
3. Se forma CaCo3$CaCO_3$ en el carbonatador al combinarse CaO y CO2, y como resultado se libera calor.
4. El calor es almacenado en forma de CaO.

Esta tecnología de almacenamiento tiene posibilidad de llegar a procesos con mayor eficiencia energética que otras tecnologías. Su principal ventaja es la alta densidad de energía en los procesos, pero tiene algunos puntos a solucionar como la capacidad de almacenamiento de energía eléctrica, la necesidad de almacenamiento de dióxido de carbono y la disminución de la actividad de los sorbentes, con la que se reduce el rendimiento del proceso. Estos desafíos han llevado a que la investigación del bucle químico se investigue durante casi 9 años y tenga una tasa TRL baja.

2.2.3. Almacenamiento de calor sensible

En un almacenamiento de calor sensible se acumula energía en un material sin ningún cambio de estado en el proceso. La cantidad de energía almacenada depende de la masa de material, la temperatura y el calor específico de este. Otras propiedades importantes en este tipo de almacenamiento son el coste del material, la difusividad, la conductividad térmica y la estabilidad química y termoquímica.

2.2.3.1. Sensible en estado gas

Se usan acumuladores de vapor aprovechando el calor sensible del agua saturada a presión. En estos sistemas, durante el proceso de carga el exceso de vapor alimenta a un recipiente presurizado con agua líquida. Este vapor se condensa, elevando la presión y temperatura del líquido del tanque, que actúa como volumen de almacenamiento. Se considera que el tanque está cargado cuando el líquido saturado sea el 90% del volumen de tanque.

La principal ventaja de este modo de almacenamiento es la alta densidad de energía dada por el almacenamiento de líquido en lugar de gas, es una tecnología implementada en otras industrias existentes de calor. Las desventajas son el pequeño volumen de almacenamiento debido a la alta presión del sistema, la baja temperatura operativa y la baja escalabilidad. Por estas razones no es económicamente atractiva para sistemas de almacenamiento de alta presión y capacidad, siendo una tecnología ineficiente.

Esta tecnología se ha instalado principalmente en plantas DSG, pero se prevé que se desarrollen conceptos diferentes y más innovadores para estas plantas. Se considera una tecnología que se implementó para satisfacer las necesidades del momento pero que no tiene mucho potencial para el futuro ya que es adecuado para pequeña escala y no presenta potencial para una mayor reducción de costos.

2.2.3.2. Sensible en estado líquido

Los sistemas de almacenamiento de energía térmica son los más utilizados actualmente, siendo las sales fundidas el único medio líquido aplicado actualmente a escala comercial. En este apartado se hará un breve resumen del almacenamiento en sales fundidas y metales líquidos, incluyendo los beneficios de la adición de nanopartículas.

2.2.3.2.1. Sales fundidas

Esta tecnología de almacenamiento de energía es la más utilizada actualmente. Las sales de uso común y sus mezclas eutécticas son la mezcla de sal ternaria HITEC (53% KNO_3, 7% $NaNO_3$ y 40% $NaNO_2$) y la mezcla de sal binaria (60% $NaNO_3$ y 40% KNO_3), más

comúnmente conocida como Sal Solar. La tecnología consta de dos tanques entre los que la sal fundida se bombea, uno caliente y otro frío. Dependiendo si el sistema es directo o indirecto, será la propia sal la que será bombeada entre los tanques o se usará aceite térmico como fluido caloportador.

Esta tecnología presenta una serie de ventajas interesantes como su elevada vida útil, de más de 20 años, una elevada temperatura de funcionamiento (565ºC) y alta densidad de energía, entre 70-200 $\frac{KWh}{m^3}$. Esta tecnología debe lidiar con la alta corrosión debida la alta inestabilidad que producen las sales utilizadas al descomponerse por encima de 560ºC, por ello se deben utilizar materiales más caros y con un mayor costo de mantenimiento. Por otro lado, el aceite térmico limita la temperatura de funcionamiento, con lo que se aumentaría la eficiencia de conversión de energía térmica en eléctrica.

Actualmente es la tecnología más utilizada para sistemas TES en plantas CSP y están disponibles en muchos países. Esta tecnología necesita seguir desarrollándose, para optimizar el sistema, elevar la temperatura de trabajo y combatir la corrosión. Además, se espera que, en un futuro cercano, pueda ser compatible con un ciclo Brayton en vez del ciclo Rankine utilizado actualmente, las razones que limita este avance es el choque térmico en el intercambiador de calor durante los ciclos o la congelación de las sales fundidas por debajo de los 400ºC.

2.2.3.2.2. Nanofluidos

Se ha descubierto que la adición de nano partículas a sales fundidas aumenta la conductividad térmica y calor específico del fluido, aumentando la densidad y reduciendo el volumen de almacenamiento. Se puede utilizar óxido de cobre, alúmina, óxido de titanio, nanotubos de carbono o dióxido de silicio con nanopartículas son tipos de nanopartículas que se añades a las sales fundidas almacenando calor sensible. A pesar de sus ventajas, esta tecnología aumenta la viscosidad del fluido, lo que aumenta el coste de bombeo, puede aumentar la corrosión y tener problemas de estabilidad, estos inconvenientes se intentarían compensar con la reducción de los medios de almacenamiento. Aun así, es necesario comprender mejor el comportamiento de los nanofluidos y de cómo se estructuran en las sales antes de que escalen a un nivel comercial.

2.2.3.2.3. Metales líquidos

Los metales líquidos pueden almacenar energía térmica sensible por encima de 1000ºC, aunque esta temperatura puede variar según el material de almacenamiento. La tecnología se usa tanto como sistemas TES como HTF en sistemas directos e indirectos. Algunos ejemplos de metales utilizados son Sodio, una aleación de Sodio-Potasio y el eutéctico Plomo-Bismuto. Se ha estudiado la configuración de tanque único termoclina, en un rango de temperaturas de 550-700ºC.

Estos materiales presentan una conductividad térmica alta y tienen un alto potencial de trasferencia de calor. Además, no tienen las limitaciones de temperatura de las sales fundidas, la temperatura de ebullición puede ser superior a 1600ºC y la de solidificación puede ser inferior a 0ºC. Algunas desventajas de este sistema son el alto costo de materia prima, el volumen de almacenamiento el cual puede ser dos veces mayor que el de las sales fundidas y la importancia de la seguridad, debido a la reactividad del agua con el sodio líquido.

Es la tecnología menos avanzada de las que se han contemplado. Su progresión futura no es prometedora debido a los desafíos de corrosión y altos costos que deberían compensarse con un aumento de la electricidad producida.

2.2.3.3. Sensible en estado solido

Los materiales sólidos para almacenamiento térmico destacan por un rango de variación de temperatura (200-1200ºC), por un coste reducido y una alta conductividad térmica. En este apartado se hará un breve resumen del almacenamiento en cama empacada y partículas sólidas, dejándose la tecnología de almacenamiento sólida más prometedora, el hormigón, para el siguiente capítulo.

2.2.3.3.1. Lecho de rocas

En esta tecnología se usa un lecho empacado de rocas como material de almacenamiento de calor sensible y aire u otros medios como fluidos de transferencia de calor. Este sistema carga la energía térmica suministrada por un fluido portador de calor y la descarga cuando sea necesario. El fluido de transferencia de calor puede circular por el interior del lecho debido a la alta porosidad de este, el fluido caliente se introduce desde la parte superior del lecho de rocas y transfiere la energía a las partículas sólidas.

Los materiales más comunes son rocas o arena locales como roca cuarcita o arena de sílice. Son importantes tanto las propiedades de material como la capacidad calorífica, como la forma y diámetro, ya que determinan el comportamiento del flujo, afectando a su temperatura de salida y al rendimiento del sistema TES.

Se ha demostrado que el material cerámico tiene un gran potencial en aplicaciones CSP a gran escala. Son la configuración más utilizada para sistemas TES de termoclina. Hay plantas que usan este tipo de sistema, pero debido a sus problemas de estatificación y a que usan un fluido secundario, son más comunes las sales fundidas. Además, al implementar la tecnología, es más sencillo usar sales fundidas tanto como fluido caloportador como para TES, que estudiar la interacción de las sales con el lecho de rocas a alta temperatura o usar aire. Aunque se pueden alcanzar eficiencias mayores en las plantas supercríticas, los lechos supercríticos, los cuales podrían resolver la dependencia de la caída de presión, son 10 veces más caros que los tanques de sales.

Esta tecnología tiene una serie de ventajas:

1. Se puede aplicar en un amplio rango de temperaturas.
2. Es un material abundante y económico.
3. La transferencia de calor es directa entre el fluido de trabajo y el material de almacenamiento.
4. El material no se degrada y tiene estabilidad química.
5. No representa ningún peligro.

Por otro lado, esta tecnología tiene como inconveniente el desafío de la estratificación térmica y el movimiento del frente de termoclina. Los principales factores que pueden afectar a estos inconvenientes son el diseño del lecho, los materiales de relleno, y el flujo de fluido, También hay otros factores como las propiedades del material de almacenamiento, la dimensión absoluta y relativa del tanque y su aspecto también pueden afectar al comportamiento del almacenamiento. Además, el uso de partículas sólidas asimétricas e irregulares da lugar a una caída de presión impredecible.

2.2.3.3.2. Partículas sólidas

Las partículas sólidas son la tecnología de almacenamiento que puede trabajar con una temperatura de operación más elevada, siendo esta entre 600-1000ºC, lo que permita operar con un ciclo de Brayton. Generalmente, las partículas sólidas son calentadas en un receptor central con la configuración de torre central. Posteriormente son trasportadas al sistema TES, donde pueden transferir el calor a otro fluido o directamente transferirse a un

intercambiador usándose como fluido de trabajo. Se dispondrán de dos contenedores de almacenamiento, uno a 800ºC con las partículas calentadas, y otro a unos 350ºC donde las partículas ya habrán transferido calor. Esta tecnología es de bajo costo y comúnmente se utilizan materiales como carburo de silicio, óxido de hierro o arena de sílice, siendo importante puntualizar que pese a que el tamaño de las partículas no es un factor en este tipo de almacenamiento, las partículas pequeñas tendrán un mayor coeficiente de transferencia de calor. A continuación, se muestran de las principales partículas sólidas consideradas, mostrándose la densidad en $\frac{kg}{m^3}$ y la capacidad calorífica en $\frac{J}{kg^{\circ}C}$.

Material	Composición	Densidad	Capacidad calorífica	Ventaja	Desventaja
Arena de sílice	SiO_2	2610	710	Estable, abundante, bajo coste	Baja conductividad
Arena de cuarzo	SiO_2	2650	755	Estable	Medio
Alumina	Al_2O_3	3960	880	Estable	Alto coste
Cenizas	SiO_2, Al_2O_3, + minerales	2100	720	Estable, abundante, sin coste o bajo coste	Identificación de cenizas adecuadas
Carburo de silicio	SiC	3210	670	Alta conductividad	Alta erosión y coste
Guijarro de grafito	C	2250	710	Alta conductividad	Oxidación, atrición

Tabla 2.Materiales usados en almacenamiento en partículas sólidas.

Las principales ventajas de las partículas sólidas son su bajo costo, pueden almacenar energía en un amplio rango de temperaturas, ser químicamente inertes y estables por encima de los 1100ºC. Mientras que los principales inconvenientes o desafíos son el diseño del intercambiador de calor de lecho fluidizado y el control de la estabilidad controlando las cargas parásitas o mecánicas.

Actualmente esta tecnología no es comercial. Tiene una serie de problemas al trabajar como fluido caloportador, y tiene que enfrentar los desafíos como el rendimiento como HTF, el receptor, el transporte de las partículas y la definición de las condiciones operativas.

2.2.3.3.3. Hormigón

El hormigón como TES es la principal alternativa que se ha ido presentando los últimos años frente a el almacenamiento en sales fundidas. Este material destaca por su alta disponibilidad y por su bajo coste, y está compuesto principalmente de cemento, agua y agregados finos y gruesos. Actualmente hay 3 plantas construidas en China con esta tecnología, las cuales no están aún en funcionamiento. Este medio de almacenamiento se verá en detalle en el apartado 3.

2.3. Análisis de los tipos de centrales termosolares actuales

En este apartado se hace una revisión de todas las centrales termosolares construidas hasta la fecha alrededor del mundo, ofreciendo datos sobre su país, su sistema de capación de calor, su sistema de almacenamiento y su potencia máxima. Adicionalmente, se hace un análisis de la potencia instalada según el tipo de planta termosolar, la proporción de plantas con cada tipo de almacenamiento, la potencia instalada por país y el porcentaje de plantas en cada estado.

Nombre	País	Tecnología	Potencia (MW)	Almacenamiento	Capacidad (horas)	Año de operación	Estado	Generación (MWh/año)	Coste (M€)
Aalborg-Brønderslev CSP project	Dinamarca	Cilindro parabólico	16.6		-	2016	Operación		
ISCC Hassi R'mel	Argelia	Cilindro parabólico	20		-	2011	Operación		
Aurora Solar Energy Project	Australia	Torre	150	Sales fundidas	8	2020	En desarrollo	500000	
Jemalong Solar Thermal Station	Australia	Torre	1.1	Sodio líquido	3	2017	Operación	2200	
Lake Cargelligo	Australia	Torre	3	Grafito central	-	2011	No operativo		
Liddell Power Station	Australia	Fresnel	3		-	2012	No operativo	13550	
Sundrop CSP Project	Australia	Torre	1.5		-	2016	Operación	1700	
City of Medicine Hat ISCC Project	Canada	Cilindro parabólico	1.1		-	2014	Operación	1500	
Atacama-1	Chile	Torre	110	Sales fundidas	17.5	2018	Operación		
Copiapó	Chile	Torre	260	Sales fundidas	14	2019	En desarrollo	1800000	
Likana Solar Energy Project	Chile	Torre	390	Sales fundidas	13	2021	En desarrollo	2800000	
Tamarugal Solar Energy Project	Chile	Torre	450	Sales fundidas	13	2021	En desarrollo	2600000	
Chabei 64MW Molten Salt Parabolic Trough project	China	Cilindro parabólico	64	Sales fundidas	16		En desarrollo		
Dacheng Dunhuang 50MW Molten Salt Fresnel project	China	Fresnel	50	Sales fundidas	13	2019	Operación	214000	
Dahan Power Plant	China	Torre	1	Vapor saturado/aceite	1	2012	Operación	1950	4
Delingha 50MW Thermal Oil Parabolic Trough project	China	Cilindro parabólico	50	Sales fundidas	9	2018	Operación		243
Gansu Akesai 50MW Molten Salt Trough project	China	Cilindro parabólico	50	Sales fundidas	15		En desarrollo		
Golden Tower 100MW Molten Salt project	China	Torre	100	Directo-sales fundidas	8		En desarrollo		
Golmud	China	Torre	200	Directo-sales fundidas	15	2018	En desarrollo	1120000	676
Gulang 100MW Thermal Oil Parabolic Trough project	China	Cilindro parabólico	100	Sales fundidas	7		En desarrollo		
Hami 50 MW CSP Project	China	Torre	50	Sales fundidas	8	2019	Operación		
Huanghe Qinghai Delingha 135 MW DSG Tower CSP Project	China	Torre	135	Sales fundidas	3.5	2017	No operativo		
Luneng Haixi 50MW Molten Salt Tower	China	Torre	50	Directo-sales fundidas	12	2019	Operación	160000	
Qinghai Gonghe 50 MW CSP Plant	China	Torre	50	Directo-sales fundidas	6	2019	Operación		153
Rayspower Yumen 50MW Thermal Oil Trough project	China	Cilindro parabólico	50	Sales fundidas	7		En desarrollo		
Shangyi 50MW DSG Tower CSP project	China	Torre	50	Sales fundidas	4		En desarrollo		

Tabla 3. Centrales termosolares 1.

Nombre	País	Tecnología	Potencia (MW)	Almacenamiento	Capacidad (horas)	Año de operación	Estado	Generación (MWh/año)	Coste (M€)
Shouhang Dunhuang 10 MW Phase I	China	Torre	10	Directo-sales fundidas	15	2016	Operación		53
Shouhang Dunhuang 100 MW Phase II	China	Torre	100	Directo-sales fundidas	11	2018	Operación	390000	
SUPCON Delingha 10 MW Tower	China	Torre	10	Directo-sales fundidas	2	2013	Operación		
SUPCON Delingha 50 MW Tower	China	Torre	50	Directo-sales fundidas	7	2018	Operación	146000	137
project	China	Fresnel	50	Sales fundidas	6		No operativo		
Urat Royal Tech 100MW Thermal Oil Parabolic	China	Cilindro parabólico	100	Sales fundidas	10	2020	Operación	350000	
Salt Tower CSP project	China	Torre	100	fundidas	10		No operativo		
Yumen 50MW Molten Salt Tower CSP project	China	Torre	50	Directo-sales fundidas	10		En desarrollo		
Yumen 50MW Thermal Oil Trough CSP project	China	Cilindro parabólico	50	Sales fundidas	7		En desarrollo		
Terasolar I	China	Fresnel	15	Hormigón	14	2017	Operación		88
Zhangbei 50MW DSG Fresnel CSP project	China	Fresnel	50	Hormigón	14		No operativo		
Zhangjiakou 50MW CSG Fresnel project	China	Fresnel	50	Hormigón	14		En desarrollo		
CY CSPc EOS Green Energy	Chipre	Torre	50	Grafito	-		En desarrollo	172000	
ISCC Kuraymat	Egipto	Cilindro parabólico	20		-	2011	Operación		
eLLO Solar Thermal Project (Llo)	Francia	Fresnel	9	Vapor	4	2019	Operación		
Jülich Solar Tower	Alemania	Torre	1.5	Cerámica	1.5	2008	Operación		
MINOS	Grecia	Torre	52	Sales fundidas	5	2020	En desarrollo		
Abhijeet Solar Project	India	Cilindro parabólico	50		-	2015	En desarrollo		
ACME Solar Tower	India	Torre	2.5		-	2011	Operación		
Dadri ISCC Plant	India	Fresnel	14		-	2017	En desarrollo		
Dhursar	India	Fresnel	125		-	2014	Operación		
Diwakar	India	Cilindro parabólico	100	Sales fundidas	4	2013	En desarrollo		
Godawari Solar Project	India	Cilindro parabólico	50		-	2013		118000	
Gujarat Solar One	India	Cilindro parabólico	25	Sales fundidas	9	2014		130000	
KVK Energy Solar Project	India	Cilindro parabólico	100	Sales fundidas	4	2013	Operación		
Megha Solar Plant	India	Cilindro parabólico	50		-	2014	Operación	110000	
National Solar Thermal Power Facility	India	Cilindro parabólico	1		-	2012	Operación		
Ashalim (Negev)	India	Cilindro parabólico	121	Sales fundidas	4.5	2019	Operación		848
Ashalim Plot B (Megalim)	India	Torre	121		-	2019	Operación		712
Archimede	Italia	Cilindro parabólico	5	Sales fundidas	8	2010	Operación	9200	
ASE Demo Plant	Italia	Cilindro parabólico	0.35	Directo-sales fundidas	-	2013	Operación	275	

Tabla 4. Centrales termosolares 2.

Nombre	País	Tecnología	Potencia (MW)	Almacenamiento	Capacidad (horas)	Año de operación	Estado	Generación (MWh/año)	Coste (M€)
Agua Prieta II	México	Cilindro parabólico	14		-	2014		2390	
Airlight Energy Ait-Baha Pilot Plant	Marruecos	Cilindro parabólico	3	Cama empacada	5	2014	Operación		
eCare Solar Thermal Project	Marruecos	Fresnel	1	Vapor	-	2014		1600	
IRESEN 1 MWe CSP-ORC pilot project	Marruecos	Fresnel	1	Buffer	0.33	2016	En desarrollo		5560
ISCC Ain Beni Mathar	Marruecos	Cilindro parabólico	20		-	2010	Operación	55000	
NOOR I	Marruecos	Cilindro parabólico	160	Sales fundidas	3	2015	Operación		1042
NOOR II	Marruecos	Cilindro parabólico	200	Sales fundidas	7	2018	Operación		
NOOR III	Marruecos	Torre	150	Sales fundidas	7	2018	Operación		
ISCC Duba 1	Arabia Saudí	Cilindro parabólico	43		-	2017	En desarrollo		
Waad Al Shamal ISCC Plant	Arabia Saudí	Cilindro parabólico	50		-	2017	En desarrollo		
Bokpoort	Sudáfrica	Cilindro parabólico	50	Sales fundidas	9.3	2016	Operación		
Ilanga I	Sudáfrica	Cilindro parabólico	100	Sales fundidas	5	2018	Operación		
Kathu Solar Park	Sudáfrica	Cilindro parabólico	100	Sales fundidas	4.5	2019	Operación		
KaXu Solar One	Sudáfrica	Cilindro parabólico	100	Sales fundidas	2	2015	Operación	330000	729
Khi Solar One	Sudáfrica	Torre	50	Vapor saturado	2	2016	Operación	180000	
Redstone Solar Thermal Power Plant	Sudáfrica	Torre	100	Sales fundidas	12	2018	En desarrollo	480000	
Xina Solar One	Sudáfrica	Cilindro parabólico	100	Sales fundidas	5	2018	Operación		746
Andasol-1 (AS-1)	España	Cilindro parabólico	50	Sales fundidas	7.5	2008	Operación	158000	
Andasol-2 (AS-2)	España	Cilindro parabólico	50	Sales fundidas	7.5	2009	Operación	158000	
Andasol-3 (AS-3)	España	Cilindro parabólico	50	Sales fundidas	7.5	2011	Operación	178000	315
Arcosol 50 (Valle 1)	España	Cilindro parabólico	50	Sales fundidas	7.5	2011	Operación	178000	270
Arenales	España	Cilindro parabólico	50	Sales fundidas	7	2013	Operación	166000	
Aste 1A	España	Cilindro parabólico	50	Sales fundidas	8	2012	Operación	170000	
Aste 1B	España	Cilindro parabólico	50	Sales fundidas	8	2012	Operación	170000	
Astexol II	España	Cilindro parabólico	50	Sales fundidas	8	2012	Operación	170000	
Borges Termosolar	España	Cilindro parabólico	50		-	2012	Operación	98000	153
Casablanca	España	Cilindro parabólico	50	Sales fundidas	7.5	2013	Operación	160000	
Enerstar (Villena)	España	Cilindro parabólico	50		-	2013	Operación	100000	
Extresol-1 (EX-1)	España	Cilindro parabólico	50	Sales fundidas	7.5	2010	Operación	158000	
Extresol-2 (EX-2)	España	Cilindro parabólico	50	Sales fundidas	7.5	2010	Operación	158000	
Extresol-3 (EX-3)	España	Cilindro parabólico	50	Sales fundidas	7.5	2012	Operación	158000	

Tabla 5.Centrales termosolares 3.

Nombre	País	Tecnología	Potencia (MW)	Almacenamiento	Capacidad (horas)	Año de operación	Estado	Generación (MWh/año)	Coste (M€)
Gemasolar Thermosolar Plant (Gemasolar)	España	Torre	20	Directo-sales fundidas	15	2011	Operación	80000	230
Guzmán	España	Cilindro parabólico	50		-	2012	Operación	104000	
Helioenergy 1	España	Cilindro parabólico	50		-	2011	Operación	95000	
Helioenergy 2	España	Cilindro parabólico	50		-	2011	Operación	95000	
Helios I (Helios I)	España	Cilindro parabólico	50		-	2012	Operación	97000	
Helios II (Helios II)	España	Cilindro parabólico	50		-	2012	Operación	97000	
Ibersol Ciudad Real (Puertollano)	España	Cilindro parabólico	50		-	2008	Operación	103000	200
La Africana	España	Cilindro parabólico	50	sales fundidas	7.5	2012	Operación	170000	370
La Dehesa	España	Cilindro parabólico	50	Sales fundidas	7.5	2011	Operación	175000	
La Florida	España	Cilindro parabólico	50	Sales fundidas	7.5	2011	Operación	175000	
La Risca (Alvarado I)	España	Cilindro parabólico	50		-	2009	Operación	105200	
Lebrija 1 (LE-1)	España	Cilindro parabólico	50		-	2011	Operación	120000	
Majadas I	España	Cilindro parabólico	50		-	2010	Operación	104500	
Manchasol-1 (MS-1)	España	Cilindro parabólico	50	Sales fundidas	7.5	2011	Operación	158500	
Manchasol-2 (MS-2)	España	Cilindro parabólico	50	Sales fundidas	7.5	2011	Operación	158000	
Morón	España	Cilindro parabólico	50		-	2011	Operación	100000	295
Olivenza 1	España	Cilindro parabólico	50		-	2011	Operación	100000	284
Orellana	España	Cilindro parabólico	50		-	2012	Operación	118000	240
Palma del Río I	España	Cilindro parabólico	50		-	2011	Operación	114500	
Palma del Río II	España	Cilindro parabólico	50		-	2011	Operación	114500	
Planta Solar 10 (PS10)	España	Torre	11	Vapor	1	2007	Operación	23400	
Planta Solar 20 (PS20)	España	Torre	20	Vapor	1	2009	Operación	48000	
Thermosolar Power Plant (PE1)	España	Fresnel	1.4	Vapor	-	2009	Operación	2000	
Thermosolar Power Plant (PE2)	España	Fresnel	30	Vapor	0.5	2012	Operación	49000	
Solaben 1	España	Cilindro parabólico	50		-	2013	Operación	100000	
Solaben 2	España	Cilindro parabólico	50		-	2013	Operación	100000	
Solaben 3	España	Cilindro parabólico	50		-	2013	Operación	100000	
Solaben 6	España	Cilindro parabólico	50		-	2013	Operación	100000	
Solacor 1	España	Cilindro parabólico	50		-	2012	Operación	100000	
Solacor 2	España	Cilindro parabólico	50		-	2012	Operación	100000	
Solnova 1	España	Cilindro parabólico	50		-	2009	Operación	113520	

Tabla 6. Centrales termosolares 4.

Nombre	País	Tecnología	Potencia (MW)	Almacenamiento	Capacidad (horas)	Año de operación	Estado	Generación (MWh/año)	Coste (M€)
Solnova 3	España	Cilindro parabólico	50		-	2009	Operación	113520	
Solnova 4	España	Cilindro parabólico	50		-	2009	Operación	113520	
Termesol 50 (Valle 2)	España	Cilindro parabólico	50	Sales fundidas	7.5	2011	Operación	113520	270
Termosol 1	España	Cilindro parabólico	50	Sales fundidas	9	2013	Operación	180000	
Termosol 2	España	Cilindro parabólico	50	Sales fundidas	9	2013	Operación	180000	
Greenway CSP Mersin Tower Plant	Turquía	Torre	1.4	1 tanque sales fundidas	-	2012	Operación		
DEWA CSP Tower Project	Emiratos Árabes	Torre	100	Directo-sales fundidas	15	2021	En desarrollo		
DEWA CSP Trough Project	Emiratos Árabes	Cilindro parabólico	600	Sales fundidas	15	2021	En desarrollo		
Shams 1 (Shams 1)	Emiratos Árabes	Cilindro parabólico	100		-	2013	Operación	210000	509
Maricopa Solar Project (Maricopa)	EE.UU.	Disco parabólico	1.5		-	2010	No operativo		
Saguaro Power Plant	EE.UU.	Cilindro parabólico	1		-	2006	No operativo	2000	5
Solana Generating Station (Solana)	EE.UU.	Cilindro parabólico	280	Sales fundidas	6	2013	Operación		1696
Genesis Solar Energy Project	EE.UU.	Cilindro parabólico	280		-	2014	Operación	580000	
Ivanpah Solar Electric Generating System (ISEGS)	EE.UU.	Torre	392		-	2014	Operación	1079000	1866
Kimberlina Solar Thermal Power Plant (Kimberlina)	EE.UU.	Fresnel	5		-	2008	No operativo		
Mojave Solar Project	EE.UU.	Cilindro parabólico	280		-	2014	No operativo	600000	1357
Sierra SunTower (Sierra)	EE.UU.	Torre	5		-	2009	No operativo		
Solar Electric Generating Station I (SEGS I)	EE.UU.	Cilindro parabólico	13.8		3	1984	No operativo		
Solar Electric Generating Station II (SEGS II)	EE.UU.	Cilindro parabólico	30		-	1985	No operativo		
Solar Electric Generating Station III (SEGS III)	EE.UU.	Cilindro parabólico	30		-	1985	No operativo		
Solar Electric Generating Station IV (SEGS IV)	EE.UU.	Cilindro parabólico	30		-	1989	Operación		
Solar Electric Generating Station IX (SEGS IX)	EE.UU.	Cilindro parabólico	89		-	1990	Operación		
Solar Electric Generating Station V (SEGS V)	EE.UU.	Cilindro parabólico	30		-	1989	Operación		
Solar Electric Generating Station VI (SEGS VI)	EE.UU.	Cilindro parabólico	35		-	1989	Operación		
Solar Electric Generating Station VII (SEGS VII)	EE.UU.	Cilindro parabólico	35		-	1989	Operación		
Solar Electric Generating Station VIII (SEGS VIII)	EE.UU.	Cilindro parabólico	89		-	1989	Operación		
Colorado Integrated Solar Project (Cameo)	EE.UU.	Cilindro parabólico	2		-	2010	No operativo		
Solar Energy Center (MNGSEC)	EE.UU.	Cilindro parabólico	75		-	2010	Operación	155000	404
Holaniku at Keahole Point	EE.UU.	Cilindro parabólico	2		2	2009	No operativo	4030	
Energy Project (Tonopah)	EE.UU.	Torre	110	Directo-sales fundidas	10	2015	Operación	500000	
Nevada Solar One (NSO)	EE.UU.	Cilindro parabólico	75		-	2007	Operación	134000	226
Stillwater GeoSolar Hybrid Plant	EE.UU.	Cilindro parabólico	2		-	2015	Operación	3000	
Tooele Army Depot	EE.UU.	Disco parabólico	1.5		-	2013	No operativo		
Kalulushi	Zambia	Cilindro parabólico	200		-	2022	En desarrollo		

Tabla 7. Centrales termosolares 5.

En las siguientes gráficas se analizan las plantas termosolares instaladas en el mundo según sus características. En la siguiente figura se muestra el porcentaje de potencia instalada según el tipo de planta, evidenciando la tecnología más popular, las centrales cilindro-parabólico (63%), seguida de las centrales de torre (33%) y siendo la menos desarrollada la de disco parabólico, ya que las dos únicas plantas existentes están en estado no operativo. Respecto a la división de plantas según la tipología de almacenamiento de energía térmica, destaca que el 44% de las plantas construidas no constan de tecnología de almacenamiento. Entre las plantas que disponen de tecnología de almacenamiento, el 80% usan sales fundidas como medio de almacenamiento, ya sea directo o indirecto, con 1 tanque o con dos, si no viene especificado que es directo o con 1 tanque, significará que usa 2 tanques con transmisión de calor indirecta. El otro 20% destacan las tres plantas en desarrollo de China que utilizan hormigón como tecnología de almacenamiento de energía térmica.

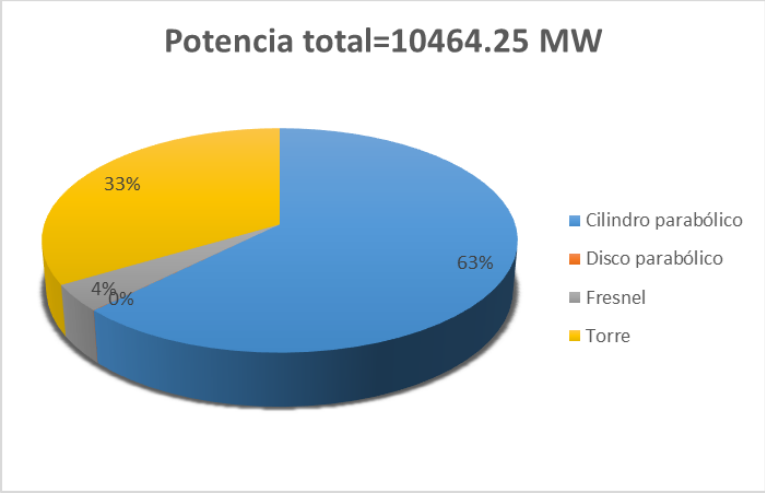


Figura 16. Distribución de potencia instalada por tecnología.

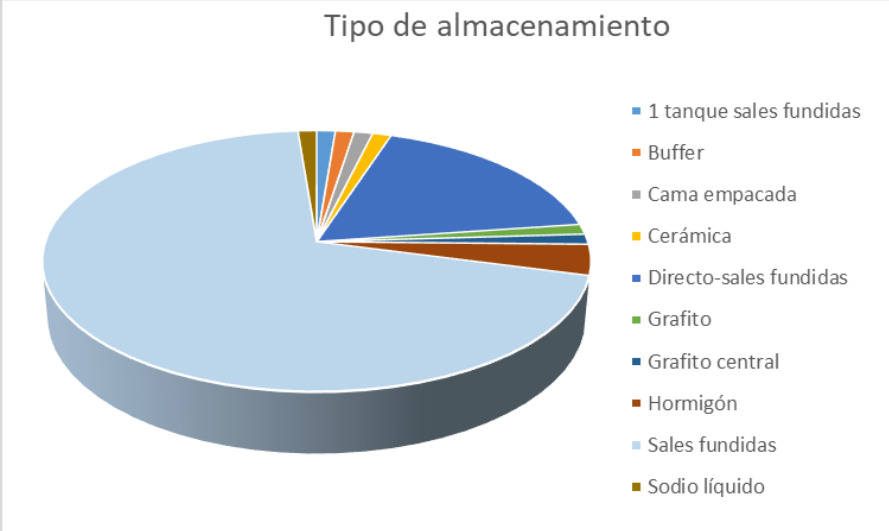


Figura 17. Cantidad de plantas con TES por tecnología.

Posteriormente, se muestra un gráfico de barras que indica la potencia instalada por países, donde destacan por orden España, EE.UU., China, Chile, seguidas de Emiratos Árabes, India, Marruecos y Sudáfrica. Respecto al estado general en el que se encuentran las centrales termosolares, se encuentran un 72% de estas en estado operativo, un 17% en desarrollo y un 11% en estado no operativo.

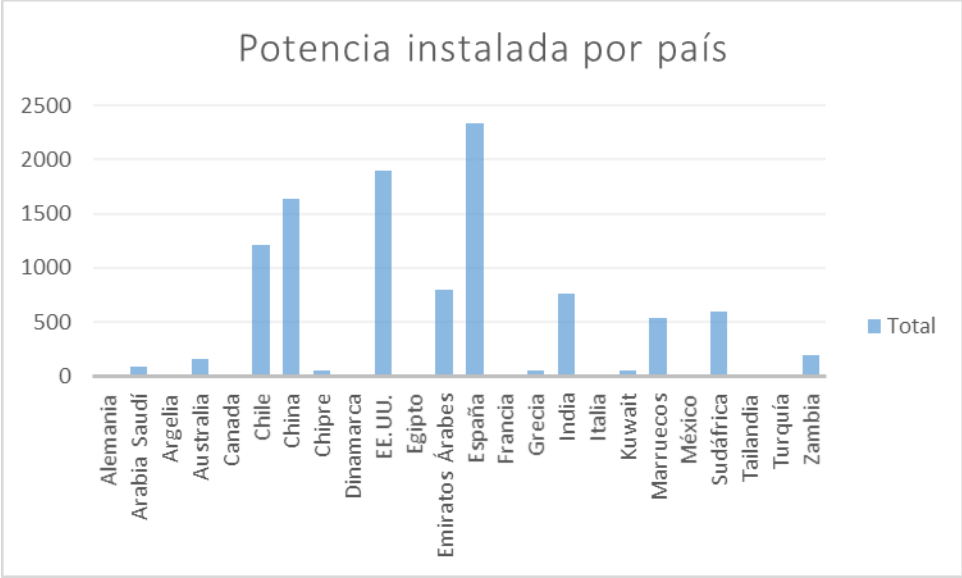


Figura 18. Potencia de plantas termosolares por país.

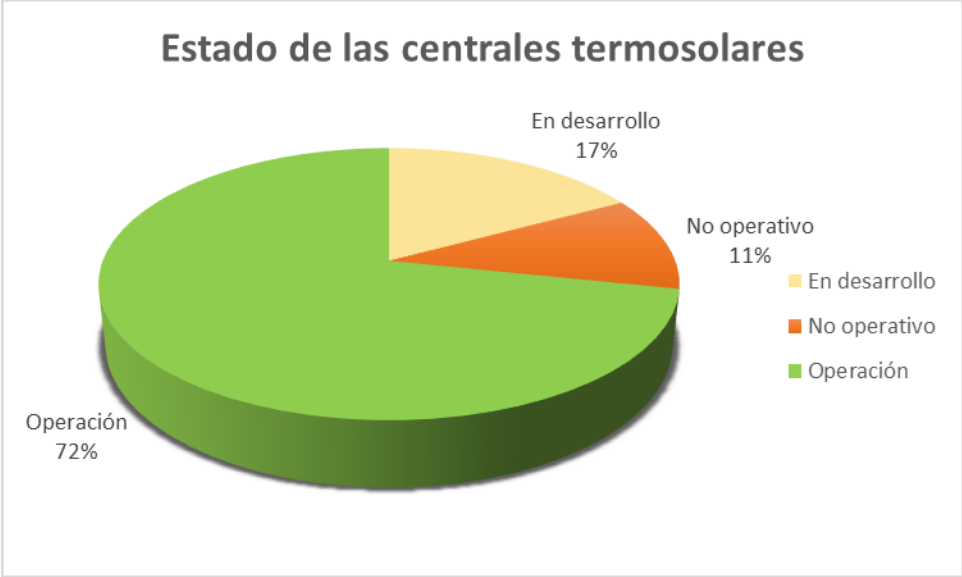


Figura 19. Estado general de las plantas termosolares construidas.

3. Almacenamiento de energía en hormigón

El almacenamiento de energía en hormigón es una alternativa a las sales fundidas, debido a la disponibilidad de la materia prima y su costo relativamente bajo. El hormigón está compuesto de cemento, agregados gruesos y finos, agua y posiblemente otros aditivos. A medida que se calienta, aparece un proceso de deshidratación de 105 a 440ºC, uno de dihidroxilación de 440 a 580ºC, uno de descarbonización de 560 a 1000ºC y pueden darse algunos cambios de fase. Esta serie de procesos son la principal causa de limitación de la temperatura del almacenamiento de energía, debido a que el cambio de fase a nivel microscópico que se produce en el desprendimiento degrada la integridad estructural del hormigón y disminuye el rendimiento al reducir su vida útil. Se han estudiado diferentes alternativas para controlar estos procesos no deseados, aunque ha sido diseñado y validado hasta 400ºC. Aunque se están llevando a cabo investigaciones de hormigón en base de cemento de alúmina de calcio para alcanzar temperaturas de 550ºC, es una tecnología en desarrollo ya que también se estudian mezclas de otros tipos de hormigón para reducir costos. El diseño del almacenamiento de calor consta de un bloque de hormigón que es atravesado por varias tuberías de acero que contienen el fluido de transferencia de calor. Un inconveniente es la diferencia de los coeficientes de expansión entre el hormigón y las tuberías de acero que contienen el fluido de transmisión de calor, lo que puede llevar al fallo de estas.

Fue en 2017 cuando se publicaron más estudios sobre esta temática, siendo 6 en EE. UU, 3 en España y 2 en China. Esta tecnología ha sido capaz de escalar hasta el nivel comercial en solo 10 años, pero a pesar de esto su estudio no llega ni al 6% de publicaciones respecto a las investigaciones con partículas sólidas. También se han encontrado 43 patentes para hormigón y energía solar concentrada, registrándose la primera en 2010.

Actualmente es el medio de almacenamiento sólido preferido en plantas CSP. Fue probada en la Plataforma Solar de Almería, el Centro Aeroespacial Alemán (DLR) y recientemente por Masdar Institute Solar Platform (MISP). A pesar de que ya ha sido desarrollado de manera comercial, el diseño de los módulos de hormigón sigue en evaluación. En 2017 Beijing TeraSolar Photothermal Technologies Co. invirtió en TeraSolar I en Zhangbei (China) la cual costó alrededor de 87.5 millones de euros. Esta planta de 15 MW utiliza la tecnología Fresnel para la captación de calor y hormigón como TES teniendo una capacidad térmica máxima de 720 MWh, proporcionando 14 horas de autonomía. Se eligió agua/vapor como fluido caloportador y una mezcla patentada de hormigón como material TES, este sistema trabaja a 450ºC, pero tiene una temperatura máxima de 550ºC. Otras dos plantas también usan esta tecnología, pero no están en operación. Adicionalmente puede revisarse una lista de las plantas termosolares en el mundo y su tipo de almacenamiento en el Anexo del documento (*https://solarpaces.nrel.gov/*).

En este capítulo se hace una revisión bibliográfica del hormigón usado como TES con el objetivo de conocer el estado actual del desarrollo de esta tecnología incluyendo estudios relevantes hasta la fecha sobre este material dedicado a este fin. Entre los diferentes estudios comparados destaca una comparativa del impacto ambiental con otras tecnologías, las propiedades del hormigón a altas temperaturas, comparativas de diferentes mezclas y como afectan los agregados en el rendimiento de estas, exposición de instalaciones de prueba reales y diferentes modelos numéricos simplificados y no simplificados encontrados en la literatura.

3.1. Evaluación comparativa del ciclo de vida e impacto ambiental

[Oró et al (2012), ref. 11] Debido a que todas las plantas de energías renovables son una alternativa ambiental a las plantas de generación de energía convencionales, se debe evaluar el impacto ambiental y la vida útil de estas. La evaluación del ciclo de vida (LCA) es el método más utilizado para evaluar los impactos ambientales, y abarca la extracción de materias primas, fabricación, transporte, uso y eliminación. El método se basa en el método de evaluación de impacto ambiental Eco-Indicator 99(EI99), extraído de la base de datos EcoInvent 2009. Se evalúa mediante:

$$IMP_j = \sum_k d_{k,j} * LCI_k$$

Siendo IMP la categoría de impacto j, ya sea salud humana, calidad del ecosistemas o recursos, $d_{k,j}$ el coeficiente de daño del componente k y el impacto j y LCI la entrada al inventario del ciclo de vida.

En este caso el LCA comparó 3 sistemas diferentes, evaluados en las mismas condiciones de operación y 3 escenarios diferentes:

- Sistema de almacenamiento en medios sólidos (hormigón): Se utiliza el sistema de almacenamiento de energía de la Plataforma Solar de Almería (España), una planta piloto con las características reflejadas en la tabla 2.
- Sistema de almacenamiento de sales fundidas: Se evaluaron los tanques de almacenamiento de sales fundidas de la planta solar Andasol 1 (España), de 600MWh de capacidad, que equivale a 5.000 toneladas de sales fundidas y cuyas características se reflejan en la tabla 3.
- Sistema de almacenamiento PCM: Se usa un prototipo de almacenamiento en materiales de cambio de fase con las características reflejadas en la tabla 4.

Características del sólido sistema TES sensible

	Unidades	Valor
Diseño de capacidad de almacenamiento	kWh	280
Densidad	kg / m ^{3}	2750
Capacidad calorífica específica	J / kg · K	916
Volumen total de la unidad de almacenamiento.	m ^{3}	10.3
Volumen de los tubos	m ^{3}	0.57
Volumen de los medios sólidos	m ^{3}	9.73

Tabla 7. Características de un módulo de hormigón. Plataforma Solar de Almería.

Debido a las diferencias entre los sistemas estudiados tanto en dimensiones, temperaturas inicial y final y la capacidad de almacenamiento, es necesario aplicar algunas hipótesis.

La energía almacenada para un día normal se supone como la ΔT entre las condiciones iniciales y finales, dicho esto se suponen 3 escenarios, sirviendo los dos últimos para comparar las tecnologías en las mismas condiciones de funcionamiento:

1. Las condiciones normales donde ΔT es 260ºC para las sales fundidas, 270ºC para el hormigón y 40ºC para el PCM.
2. La ΔT se fija en 50ºC.
3. La ΔT se fija en 250ºC.

Características del sistema TES de sales fundidas.

	Unidades	Valor
Diámetro	metro	22.4
Altura	metro	11
Volumen total de la unidad de almacenamiento.	m^3	4335
Peso de acero	t	279
Espesor del material aislante lateral.	mm	125
Espesor de aislamiento del techo	mm	125
Foamglas ® espesor	mm	40
Número de cimientos de ladrillo	–	2
Número de recipientes de ladrillo (radialmente) montados)	–	1
Número de fondo de ladrillo	–	5

Tabla 8. Características TES sales fundidas. Andasol 1.

Características del sistema PCM TES

	Unidades	Valor
Dimensiones del prototipo TES		
Longitud	mm	4310
Altura	mm	586
Anchura	mm	596
Volumen	m^3	1.505
Dimensiones del haz de tubos		
Número de tubos	–	6
Longitud de las tuberías	metro	24
Diámetro	mm	22
Grosor	mm	3
Volume exterior	m^3	0.05474
Volumen neto	m^3	0.02579
Densidad	m^3 / kg	7850
Masa	kg	202.42

Tabla 9. Características TES en PCM.

En la tabla 9 mostrada a continuación se aprecian las temperaturas consideradas en cada escenario según la tecnología de almacenamiento.

Es importante calcular la capacidad de almacenamiento, dividiendo la energía total almacenada entre los kg de material. El siguiente diagrama de barras muestra la capacidad de almacenamiento de cada tecnología en cada uno de los escenarios, siendo el sistema PCM el material con mayor capacidad debido al calor latente del cambio de fase, seguido de las sales fundidas.

Rango de temperatura en cada escenario y en cada sistema TES

		Alta temperatura [° C]	Baja temperatura [° C]
Escenario 1 Condiciones normales	Medios sólidos	390	120
	Sales fundidas	550	290
	PCM	235	195
Escenario 2 ΔT = 50 ° C	Medios sólidos	390	340
	Sales fundidas	550	500
	PCM	246	196
Escenario 3 ΔT = 250 ° C	Medios sólidos	390	140
	Sales fundidas	550	300
	PCM	346	96

Tabla 10.Rango de temperatura en cada TES.

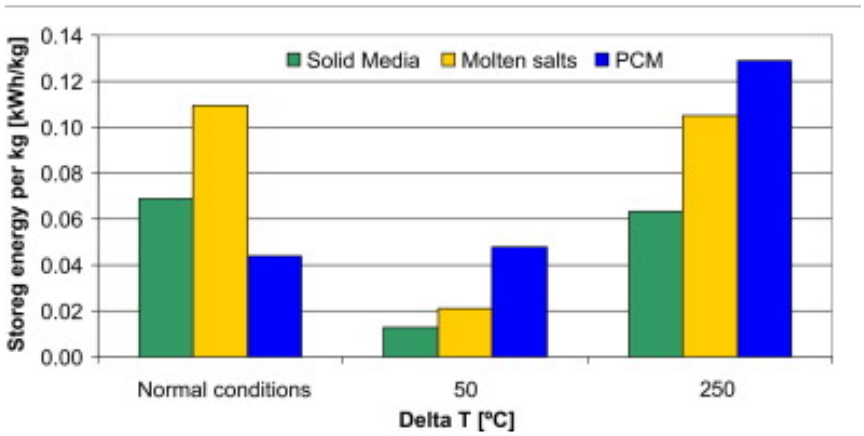


Figura 20. Capacidad de almacenamiento de cada tecnología TES.

Tanto en la tabla como en la figura siguiente se muestran los impactos globales de las tres tecnologías y dividiéndose este en impacto a la salud humana, los recursos y a la calidad del ecosistema. Es necesario aclarar que el impacto la fase operativa únicamente se da en las sales fundidas debido a dos bombas de sales, una de agua en el sistema refrigerador y calentadores eléctricos.

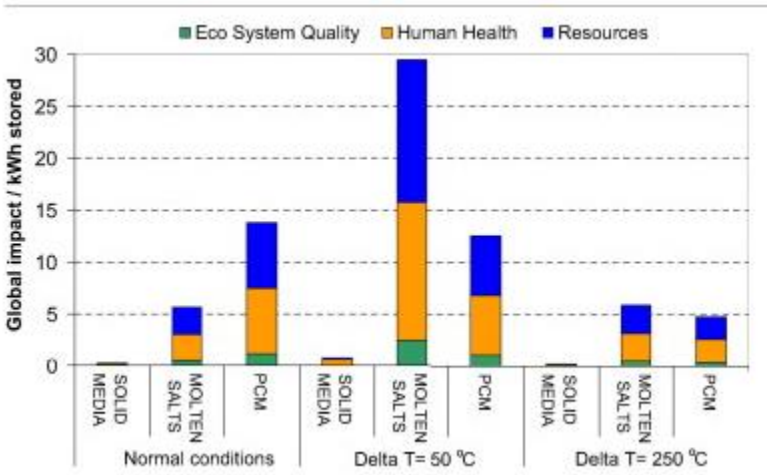


Figura 21. Impactos globales de cada TES.

Manufacturing + operation GLOBAL IMPACT/kWh					
		Eco system quality [Impact/kWh]	Human health [Impact/kWh]	Resources [Impact/kWh]	Total
Scenario 1 Normal conditions	Solid media	0.01	0.10	0.04	0.15
	Molten salts	0.47	2.55	2.65	5.67
	PCM	1.12	6.31	6.36	13.79
Scenario 2 ΔT = 50 °C	Solid media	0.04	0.53	0.22	0.80
	Molten salts	2.43	13.27	13.76	29.47
	PCM	1.02	5.76	5.80	12.59
Scenario 3 ΔT = 250 °C	Solid media	0.01	0.11	0.04	0.16
	Molten salts	0.49	2.65	2.75	5.89
	PCM	0.38	2.14	2.16	4.68

Tabla 11. Impactos globales de cada TES.

Se evidencia con esto las diferentes características de los diferentes sistemas. El sistema de almacenamiento en hormigón tiene un diseño simple y no tiene recipiente de almacenamiento y, a pesar de tener la capacidad de almacenamiento más baja, es la tecnología más respetuosa con el medio ambiente, siendo el impacto global por kWh el más bajo.

3.2. Propiedades del hormigón hasta 1000ºC

[J. Wang et al (2014), ref. 14] La gran resistencia al fuego del hormigón se debe a la combinación de sus componentes, lo hacen un material prácticamente inerte, con una lenta disminución de su resistencia debida a la temperatura, una alta capacidad térmica y baja conductividad térmica, esto lo convierte en un buen material ante situaciones de incendio.

Las propiedades térmicas determinan la transferencia de calor en el material, las mecánicas determinan la resistencia del material y el deterioro de la rigidez de este, y la deformación determina la extensión de las deformaciones. Las propiedades del hormigón comentadas varían con la temperatura y dependen de las características y composición del hormigón y del acero de refuerzo, aunque este apartado se centrará en el hormigón, debido a ser la variación del hormigón, mayor que la del acero, por la variación de humedad del primero.

Tradicionalmente, la resistencia a la compresión del hormigón solía ser de alrededor de 20 a 50 MPa, que se clasifica como hormigón de resistencia normal (NSC). En los últimos años, el hormigón con una resistencia a la compresión en el rango de 50 a 120 MPa se ha vuelto ampliamente disponible y se conoce como hormigón de alta resistencia (HSC). Cuando la resistencia a la compresión excede los 120 MPa, a menudo se le conoce como hormigón de ultra alto rendimiento (UHP). La resistencia del hormigón se degrada con la temperatura y la tasa de degradación de la resistencia está altamente influenciada por la resistencia a la compresión del concreto.

3.2.1. Propiedades térmicas

En este apartado de tratan las propiedades térmicas del hormigón dependientes de la temperatura, siendo estas la conductividad térmica, el calor específico y la pérdida de masa. Las mismas dependen de la composición del hormigón, los agregados y la humedad de este.

3.2.1.1. Conductividad térmica

La conductividad térmica del hormigón a temperatura ambiente está entre 1.4-3.6 $\frac{W}{m*K}$. Se muestra en la siguiente figura, la evolución de la conductividad térmica con la temperatura del hormigón basado en datos experimentales. La parte sombreada representa el rango según los datos de las pruebas obtenidos, atribuyéndose principalmente a las técnicas utilizadas, tipo de agregado, húmedas y condiciones en las que se hace la prueba. También se señalan los límites de la conductividad térmica según Eurocode.

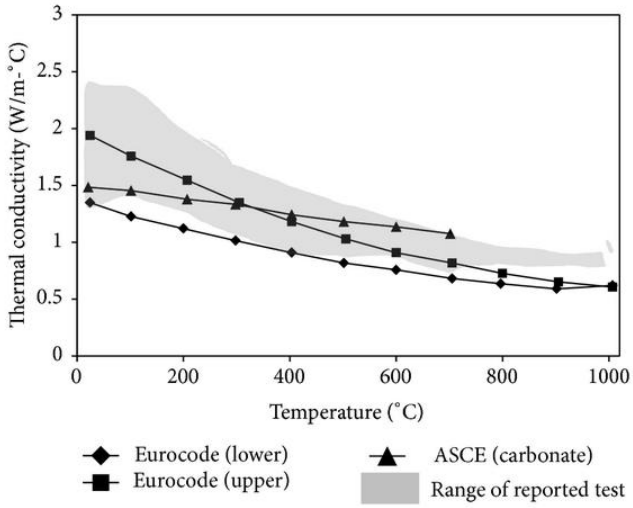


Figura 22. Conductividad térmica hormigón a altas temperaturas.

De la figura anterior se puede deducir que la conductividad térmica disminuye a medida que aumenta la temperatura. Por otro lado, el hormigón de alta resistencia (HSC) tendrá una mayor conductividad térmica que el de baja (NSC), la conductividad del hormigón reforzado con fibras de acero y polipropileno no variará demasiado por la adición de este material en un rango de temperatura 20-800ºC.

3.2.1.2. Calor específico

Respecto al calor específico, varía entre 840-1800$\frac{J}{kg*K}$. Esta propiedad varía según las transformaciones químicas y físicas del material como la evaporación del agua libre, la disociación de $Ca(OH)_2$ en CaO y H_2O entre 400-500ºC y la transformación en cuarzo de algunos agregados a partir de 600ºC.

La siguiente figura muestra la variación del calor específico del hormigón NSC con la temperatura basándose en datos de diferentes estudios. Se puede apreciar que esta propiedad permanece constante hasta los 400ºC y que tras un pico a los 700ºC vuelve a mantenerse constante a partir de los 800ºC.

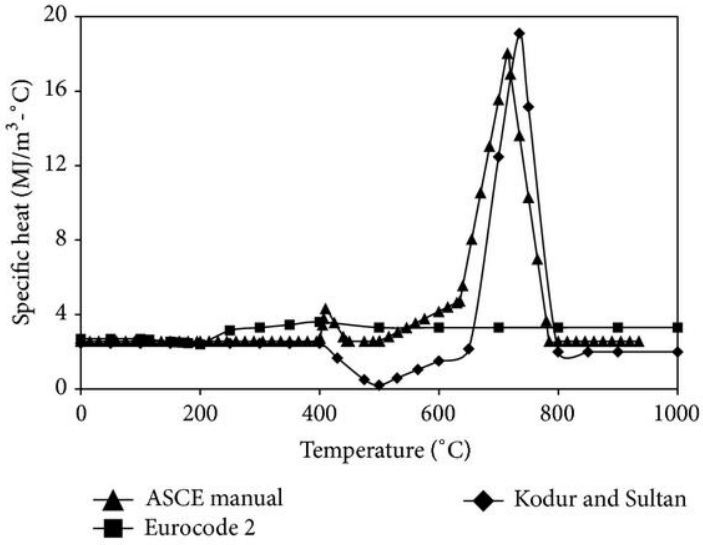


Figura 23.. Calor específico del hormigón a altas temperaturas.

Comparando el hormigón de resistencia normal con el de alta resistencia, el de alta resistencia (Kodur and Sultan) tiene un calor específico ligeramente más bajo en el rango de temperaturas 20-800ºC. Adicionalmente, un hormigón con fibras de polipropileno presenta un menor calor específico en el rango 600-800ºC, mientras que un hormigón con fibras de acero aumenta el calor específico en el rango 400-800ºC. El primer caso se atribuye a que, al quemarse las fibras, facilitan la liberación del vapor, mientras que el segundo se atribuye al calor adicional absorbido por la deshidratación del agua ligada químicamente. Por encima de 600°C, se necesita una enorme cantidad de calor para elevar la temperatura del hormigón con agregado de carbonato, el cual es diez veces el calor necesario para producir el mismo aumento de temperatura en el hormigón con agregado silíceo.

3.2.1.3. Pérdida de masa

Por último, en este apartado, se aclara la pérdida de masa en el hormigón, la cual disminuye al aumentar la temperatura por una disminución de la humedad. Debido a la influencia de los agregados en la capacidad de retener su masa, la figura 3 muestra la variación de la masa del

hormigón hechos con carbonatos o agregados silíceos.

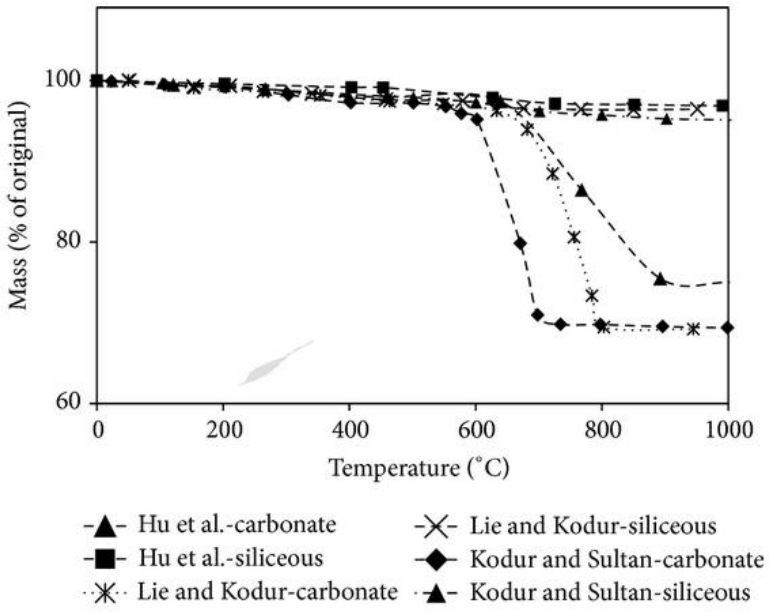


Figura 24. Pérdida de masa del hormigón a altas temperaturas.

En la figura anterior se observa que la pérdida de masa es despreciable en el hormigón para temperaturas menores de 600ºC, también se concluye que la pérdida de masa del carbonato es mucho mayor a partir de 600ºC asociada a la disociación de dolomita. Por su lado, la resistencia alta o baja del hormigón no influye en la pérdida de masa de este a altas temperaturas y tampoco varía significativamente si al hormigón se le agregan fibras, ya que en ambos casos variará ligeramente a partir de que este alcance los 800ºC.

3.2.2. Propiedades mecánicas

Las principales mecánicas del hormigón para evaluar su resistencia al fuego son la resistencia a compresión, a tracción, el módulo elástico y la respuesta de tensión-deformación en la compresión. Las pruebas para determinar las propiedades mecánicas se suelen hacer con cilindros o cubos del material de diferentes tamaños, esto se debe a la falta de estándares para realizar estas pruebas mecánicas a alta temperatura.

3.2.2.1. Resistencia a compresión

En las figuras 20 y 21 se muestra la relación de la resistencia a compresión del hormigón normal y de alta resistencia a alta temperatura. Se muestran distintas relaciones de resistencia usando distintos tipos de hormigón y se sombrean los límites del rango según las distintas pruebas. El mayor rango de los límites de NSC se atribuyen a un mayor número de pruebas de este tipo de hormigón y una menor tendencia de este a fragmentarse a altas temperaturas.

En el caso del NSC, un hormigón de resistencia normal se verá afectado a partir de 400ºC, este tipo de hormigón permite una fácil difusión de la presión por los poros que aparecen con el vapor de agua. El hormigón de alta resistencia (HSC) por su parte, tiene una microestructura más densa que mejora la resistencia a compresión debido a los diferentes aglutinantes añadidos como la escoria o el humo de sílice, pero al no permitir que la humedad escape del material, trabaja peor a altas temperaturas desarrollando microgrietas y provocando un rápido deterioro del material. Las fibras de acero añadidas al hormigón ayudan a paliar la pérdida de resistencia a altas temperaturas.

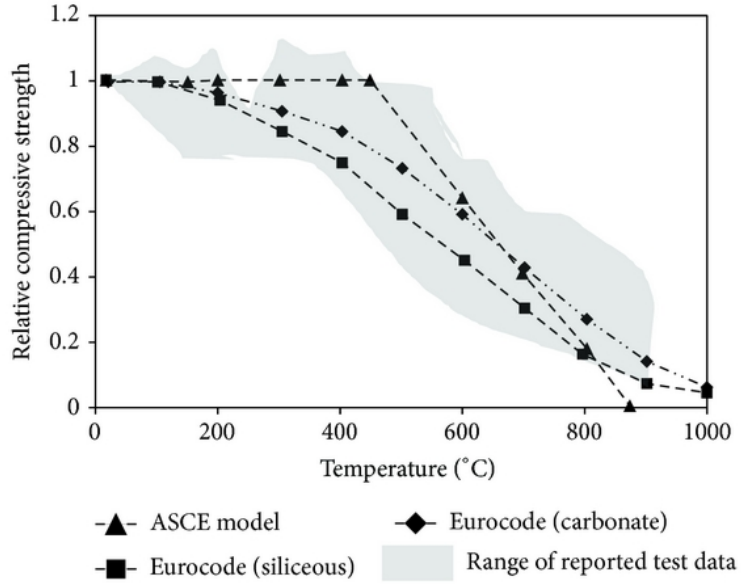


Figura 25. Resistencia a compresión de NSC a altas temperaturas.

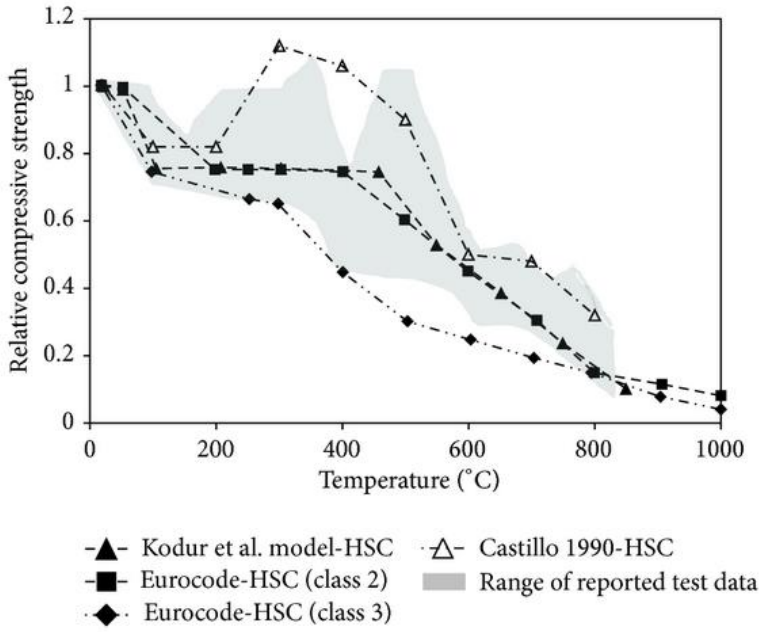


Figura 26.Resistencia a compresión de HSC a altas temperaturas.

3.2.2.2. Resistencia a tracción

La resistencia a tracción en el hormigón es mucho menor que la resistencia a compresión y es muy importante ya que el agrietamiento en el hormigón se da en muchos casos por esta causa y siendo esta aún más crucial en los casos en los que se produce desprendimiento inducido por incendio. La siguiente figura muestra la resistencia a tracción de hormigón de resistencia normal y de alta resistencia, siendo la parte sombreada el rango de resultados según el diferente número de pruebas.

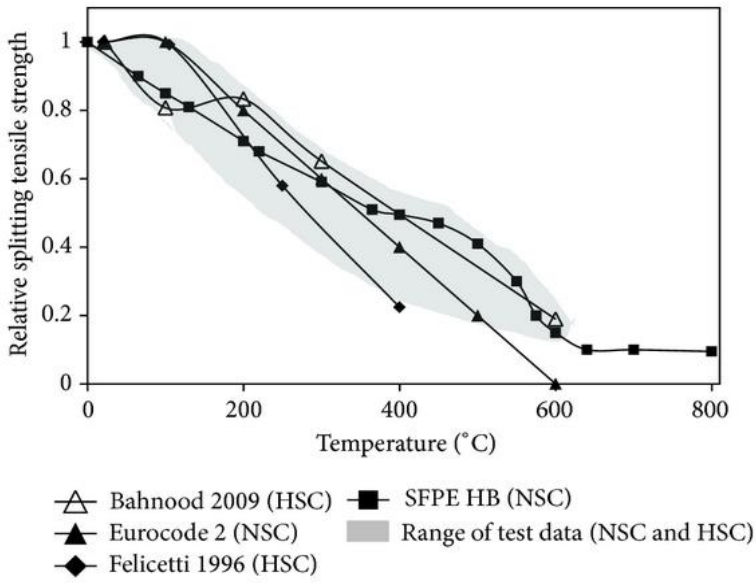


Figura 27. Resistencia a tracción del hormigón a altas temperaturas.

Se observa que a 300ºC el hormigón tiene un 80% de su resistencia a tracción inicial, la cual aumenta más rápidamente por la aparición de microgrietas hasta 600ºC, donde llega a un 20% de su resistencia a tracción inicial. La disminución de resistencia en el NSC se puede atribuir a la aparición de microgrietas por una microestructura débil. Además, la adición de fibras de acero hace que la resistencia a tracción mejore, siendo un 50% mayor a temperatura ambiente, y, disminuye la velocidad de disminución de resistencia con la temperatura al retrasar la propagación de las grietas en las muestras de hormigón.

3.2.2.3. Módulo de elasticidad

A temperatura ambiente el módulo de elasticidad del hormigón puede variar entre $5 * 10^3 - 35 * 10^3 MPa$, dependiendo en gran parte de la proporción de agua y cemento de esta, los agregados, la edad del hormigón y el método de condicionamiento. La siguiente figura muestra como disminuye el módulo elástico con la temperatura, la cual evidencia la rápida pérdida del módulo elástico a altas temperaturas, presentándose a poco más de 400ºC aproximadamente la mitad del módulo elástico del hormigón.

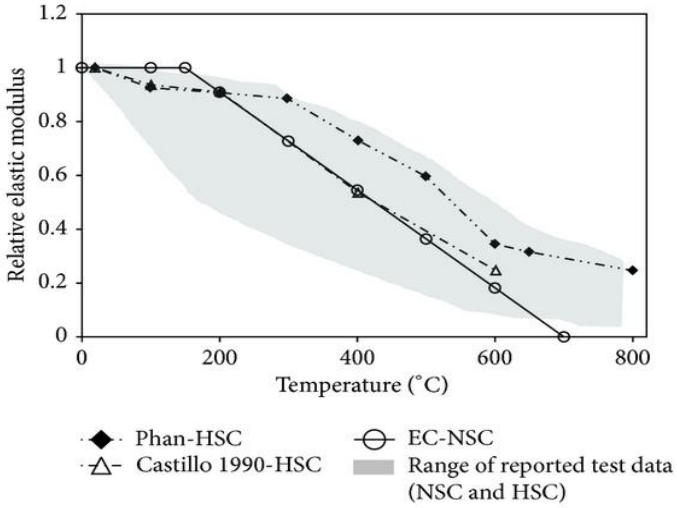


Figura 28. Módulo de elasticidad del hormigón a altas temperaturas.

3.2.2.4. Tensión deformación

La curva tensión-deformación es muy útil para analizar la respuesta al fuego del hormigón. Un aumento de temperatura hace que disminuya la resistencia a compresión y aumente la ductilidad del material, por lo que consecuentemente, disminuirá la pendiente de la curva tensión-deformación. Las siguientes figuras muestras las curvas de tensión deformación de hormigón de resistencia normal y de alta resistencia a diferentes temperaturas de 23 a 800ºC, siendo el pico máximo de tensión de las muestras alcanzado entre 300 y 400ºC. Por otro lado, se observa que HSC tiene una respuesta más frágil que el NSC. En las muestras a las que se les añadió fibra de acero tuvieron una respuesta más dúctil que aquellas a las que no se añadió.

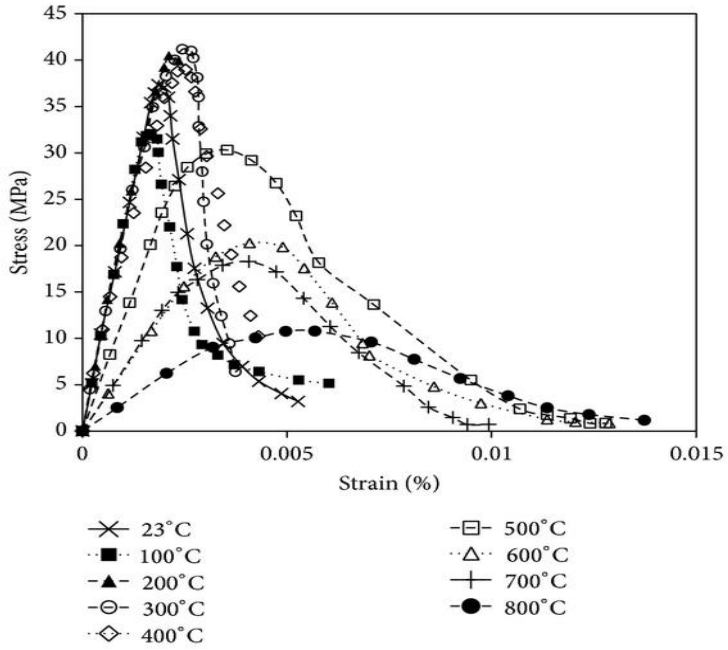


Figura 29. Curva tensión-deformación NSC.

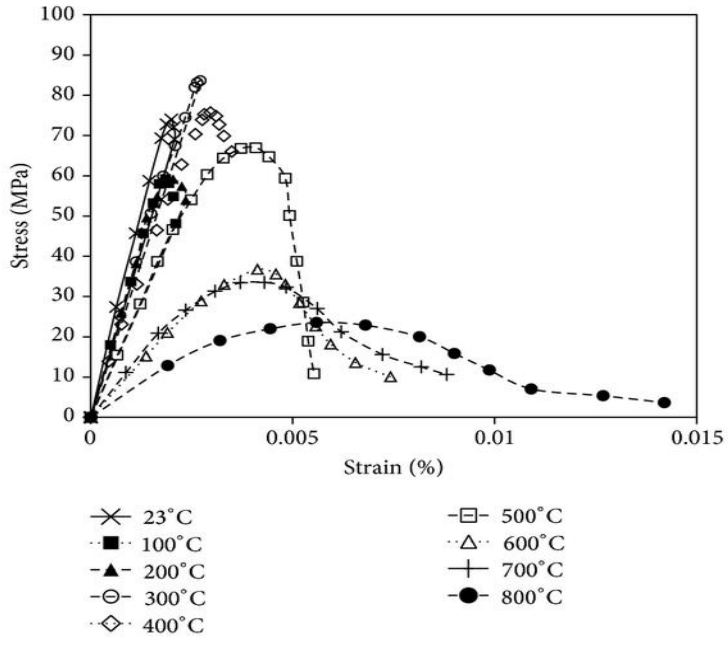


Figura 30. Curva tensión deformación HSC.

3.2.3. Deformación

3.2.3.1. Expansión térmica

El hormigón se expande térmicamente a altas temperaturas, el porcentaje de expansión térmica de 0ºC a 700ºC puede ser de 1.3%, aunque posteriormente permanece constante hasta que alcanza los 1000ºC. Esta característica se debe principalmente a los agregados y la pasta de cemento del hormigón. Además, la expansión térmica se hace más complicada con los cambios de volumen producidos por la humedad, las reacciones como la deshidratación o cambios de composición y con las microgrietas que aparecen con las tensiones térmicas no uniformes.

En la siguiente figura se muestra expansión térmica presentada antes un aumento de temperatura en 3 muestras diferentes, la sombra grisácea es debida al rango de datos aportada por diferentes investigadores.

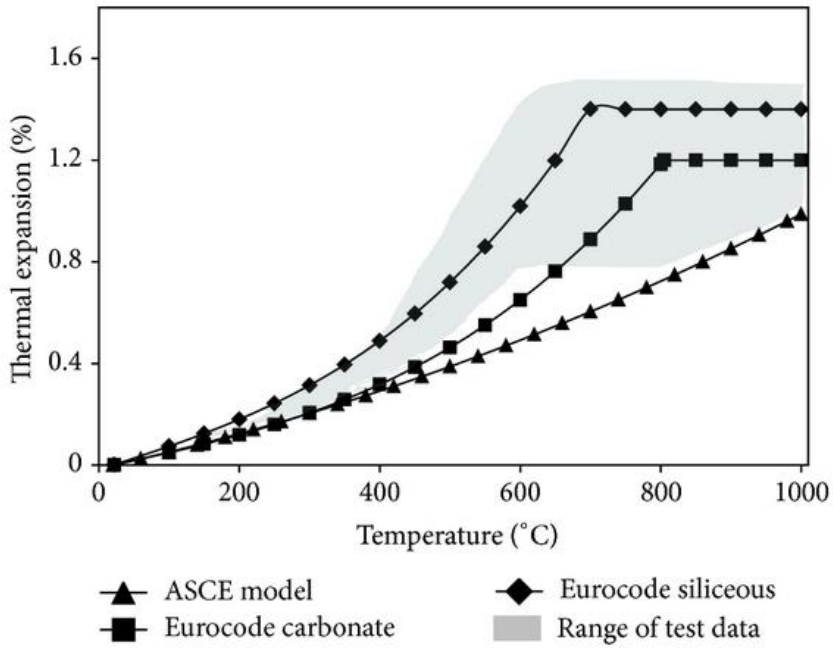


Figura 31. Expansión térmica en función de la temperatura.

Se ha demostrado que el hormigón al que se le agrega silíceo tiene una expansión térmica más alta que al que se le agrega carbonato. La presencia de fibras tiene una influencia moderada y para el HSC, la expansión térmica disminuye de 600-800ºC, lo cual se atribuye a la pérdida de agua unida químicamente a los hidratos. Posteriormente, aumentará por un ablandamiento del hormigón y la aparición exagerada de grietas.

3.2.4. Descamación inducida por fuego

En las investigaciones realizadas al abordar este tema, hay una gran variedad de investigaciones que se contradicen entre sí, algunos investigadores informan de un nulo o mínimo desprendimiento, mientras que otros aseguraron desprendimientos graves en hormigón expuesto a fuego. Una razón para esta confusión puede ser la gran cantidad de factores que influyen en el desprendimiento, donde juegan un papel esencial los agregados y la forma de calentamiento. Sin embargo, la mayoría coinciden en que las principales causas son la baja permeabilidad del material y la migración de humedad a altas temperaturas. Las dos teorías principales que explican el fenómeno de desprendimiento en los bloques de hormigón:

- Dilatación térmica restringida: Según esta teoría, la dilatación térmica cercana a las superficies produce tensiones paralelas a la superficie y desembocan en una ruptura frágil o desprendimiento en el material.
- Acumulación de presión: Según esta teoría, la presión de vapor que queda atrapada dentro del hormigón a altas temperaturas da lugar a altas tensiones en los poros que cuando superan la tensión límite de tracción del hormigón provocan el desprendimiento y aumentan al disminuir la permeabilidad del material. Este desprendimiento puede ser explosivo según las características del hormigón.

Puede darse este efecto en todos los tipos de hormigones, pero es más común que suceda en hormigones de alta resistencia (HSC) y ultra alta resistencia debido a la baja permeabilidad de estos y baja relación agua-cemento, siendo más sensibles a la aparición de grietas frágiles y a la aparición de un desconchado explosivo, incluso a velocidades lentas de calentamiento como 1 $\frac{ºC}{min}$. Los HSC tienen una resistencia a tracción de aproximadamente 5MPa, cuando el vapor de agua no encuentra escape dentro del material conduce a fuertes gradientes de presión en la superficie, siendo estos del orden de 8 MPa para una temperatura de 300ºC. En algunas pruebas se encuentra un desprendimiento de naturaleza explosiva, por tanto, el desprendimiento es una preocupación importante sobretodo en el sector de la construcción, por lo que hay que evaluar de manera correcta la resistencia al fuego. Debido a la gran cantidad de factores que influyen en el desconchado, deben de ser analizados uno por uno. Los principales factores que afectan al desprendimiento son:

- Humedad relativa: Son especialmente sensibles aquellos hormigones con humedad relativa alta, especialmente aquellos con esta mayor del 75%. Además, el tiempo necesario para alcanzar niveles de humedad aceptables será mayor en los HSC que en los NSC, debido a la baja permeabilidad de los primeros, el vapor de agua hace que aumente la tensión dentro del material al tener dificultades para encontrar una vía de escape disminuyendo así la tensión en el hormigón.
- Agregado: El tipo de agregado también afecta a la descamación. De los dos tipos de agregados más comunes, el agregado de carbonato tiene una mayor resistencia al fuego y al desconchado en comparación con el de silíceo, ya que, en comparación, los hormigones con agregado de carbonato poseen una mayor capacidad calorífica que es beneficiosa en prevenir el desconchado del hormigón.
- Dimensiones: Se ha demostrado que un tamaño más grande de la muestra dificulta el transporte de humedad.
- Resistencia: Los hormigones de alta y ultra alta resistencia se caracterizan por su poca permeabilidad y baja resistencia a descamación, por lo que serán más adecuados los hormigones NSC.
- Carga: La probabilidad de desconchado aumenta si el elemento está sometido a una carga, y aumentará aún más si esta carga es de flexión.
- Expansión térmica: El hormigón con un bajo coeficiente de expansión térmica tendrá más probabilidad de desconcharse, ya que la expansión reduciría las tensiones térmicas producidas.
- Refuerzo: La presencia de un refuerzo siempre previene o retrasa el desarrollo del desconchado.
- Densidad: La densidad aumenta el riesgo de desconchado. Esta depende del tipo de agregado y del w/cm, los hormigones de alta resistencia se hacen densos añadiendo agregados de peso normal, reduciendo w/cm y en muchas ocasiones añadiendo humo de sílice, por lo que este tipo de hormigones no serán recomendables.

La gran variedad de factores que afectan al desprendimiento como resistencia, densidad, carga, agregado, humedad, o porosidad entre otros, hacen que sea un fenómeno poco predecible, aunque se puede asegurar que el aumento de la porosidad con la temperatura es la propiedad más significativa. También se ha demostrado que la resistencia a descamación puede incrementarse mediante fibras de polipropileno, lo cual se verá en un apartado posterior, esto es debido a que al alcanzar 170ºC, las fibras se funden, dando lugar a poros que alivian la presión dentro de la estructura de hormigón, lo que en un apartado posterior se aplicará a hormigones de alta y ultra-alta resistencia. En otros experimentos, habiéndose medido presiones de desconchado a una serie de hormigón de 2,1MPa, posteriormente se añadieron fibras de propileno a otras muestras, reduciendo la presión de poro en un 43% en las muestras de 1.5 $\frac{kg}{m^3}$ y de hasta un 300% en las de 3 $\frac{kg}{m^3}$. Adicionalmente, el autor adjudica esta caída de presión no solo a la adición de fibras, sino también al gradiente térmico, ya que un alto gradiente influye en la presión de poro, pudiendo causar microgrietas que disipen la presión de vapor. Los tipos de fibras utilizadas son de monofilamentos, multifilamento y fibrilado con un diámetro de 0,00072 pulgadas y la cantidad más común es de 2 $\frac{kg}{m^3}$.

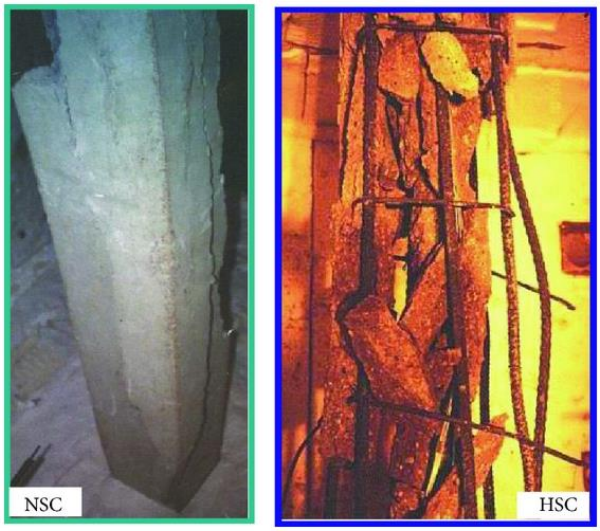


Figura 32. Desprendimiento en dos columnas de hormigón

3.3. Evaluación comparativa diferentes mezclas de hormigón

En este apartado se analizan diferentes estudios comparativos de hormigón encontrados en la literatura. Cada uno de ellos compara el rendimiento de distintas mezclas de hormigón, ya sea según su material de los tubos, o las propiedades de las mezclas según su composición. El tercer apartado es exclusivo de mezclas destinadas al almacenamiento de energía térmica en hormigón, mientras que en el cuarto se evalúa el hormigón para almacenamiento de energía térmica en sales fundidas.

3.3.1. Comparativa tres mezclas de hormigón con aletas a 180 ºC

[Jian, Y et al. (2013), ref. 10] En el presente estudios se probaron tres prototipos de TES, (M1) prototipo de acero fundido, (M2) prototipo de hormigón con tubos con aletas de cobre y (M3) prototipo hormigón con tubos de acero dulce. A los tubos se les soldó 5 aletas longitudinales de 10x1mm y tuvieron un tiempo de curado de 28 días. Los prototipos eran de 15 MJ y un tamaño de 1x0,3m. Se usó como fluido caloportador Hi-tech Therm 60. Al finalizar el experimento se hacen las siguientes conclusiones:

- El tiempo de carga/descarga del prototipo M1 (15MJ) para el rango de temperatura 353 a 413 K fue de 1263 y 1803 segundos, mientras que el tiempo efectivo para las mezclas M2 y M3 (14,06 MJ) con un rango de 353 a 433 K fue 5210/ 6297 segundos para M2 y 7160/7780 segundos para M3, esto se debe a la mayor conductividad térmica del cobre respecto del acero dulce.
- Al probar los prototipos a las velocidades de 0.1-0.25-0,5 $\frac{m}{s}$ se observan grandes diferencias de tiempos al cambiar de 0,1 a 0,25 m/s (-50%), al contrario que al variar de 0,25 a 0,5 $\frac{m}{s}$ (-20%).

Este experimento tuvo que limitarse a una temperatura de funcionamiento de 180ºC al estar en condiciones de laboratorio, a pesar de que los prototipos fueron diseñados para trabajar a 400ºC, esto se debe a las altas presión del vapor y la expansión del aceite térmico.

3.3.2. Comparativa de 7 mezclas de hormigón

[John E.E. (2012), ref. 8] Se evalúa el comportamiento de hormigón de alta y ultra alta resistencia cuando se expone a 600ºC. Las mezclas 1,3,5,6 y 7 se curaron de acuerdo con ASTM C31, se sumergieron a 22ºC durante 28 días. Las muestras 2 y 4, de las cuales no se sabe con exactitud la combinación de materiales cementosos al ser mezclas patentadas, se curaron al 100% de humedad a 90ºC durante 2 días. Estas dos últimas mezclas son las de ultra alta resistencia.

Materiales (lb/yd3)	Mezclas						
	1	2	3	4	5	6	7
Cemento	900	-	1004	-	1004	1500	1125
Cenizas volantes	-	-	-	-	-	500	375
Humo de sílice	-	-	112	-	112	-	-
Agregados gruesos	1700	-	1420	-	1420	-	-
Agregados finos	1211	-	1350	-	1350	1435	1780
Agua	270	220	228	220	228	406	450
w/cm	0.3	0.15	0.22	0.15	0.22	0.2	0.3
HRWR	4_1	51	19_1	51	23_1	12_1	8_1
Fibras PP	-	-	-	-	3.375	3.375	3.375
Fibras de acero	-	264	-	-	-	-	-
UHPC2	-	3698	-	3698	-	-	-

Tabla 12. Composición 7 mezclas de hormigón.

1. Tasa de dosificación de onzas líquidas / 100 cwt, cwt = peso de cemento, 1 fl oz / 100 lb = 65,2 mL / 100 kg

2. Premezclas patentadas, 1 $\frac{lb}{yd_3}$ = 0.593 $\frac{kg}{m}$

Posteriormente se muestra la tabla de resultados en la que se observa:

- Las muestras 1,2,3 y 4 tuvieron un desconchado explosivo debido a las altas presiones internas producidas por el vapor en su interior, lo que se atribuye a la falta de fibras PP.

- El hormigón de ultra alta resistencia sin fibras de polipropileno no puede alcanzar temperaturas mayores a 932ºF(500ºC).
- Las muestras 5-7 las cuales tenían fibras de PP multifilamento de 2 kg/m3, resistieron hasta 1122ºF (600ºC).
- En aquellas muestras en las que se alcanzó 500 y 600ºC a velocidad constante se observó un micro agrietamiento significativo, sin embargo, en aquellas a las que se les dejó reposar a 400ºC durante 2 horas se observó poca o ninguna microgrieta.
- Las muestras calentadas a mayor velocidad retuvieron una resistencia comparativamente menor que las muestras calentadas a una velocidad menor.
- La mezcla con mayor resistencia residual a compresión fue la mezcla 6, mientras que las mezclas 5 y 7 retuvieron el 20 y 33%. La menor resistencia residual de la mezcla 5 respecto de la mezcla 6 se atribuye a una presencia de agregados gruesos, no presentes en la mezcla 6.
- Un estudio posterior mostró que al aumentar la dosis de fibras PP de 3.4 a 10 $\frac{lb}{yd^3}$, no variaba mucho la resistencia a compresión residual de los hormigones de ultra-alta resistencia calentado a 600ºC y todas las que no tenían fibras PP explotaron.

Mezcla	Edad del hormigón en la prueba (días)	Velocidad de calefacción (°F/min.)	Temperatura máxima (°F)	Resistencia a compresión inicial (ksi)	Resistencia a compresión residual (ksi)
1	14	12.6	910	10.8	0
	21	5.4	865	NA	
	28	5.4	873	13	
	56	9	910	NA	
	56	12.6	921	NA	
2	>8	5.4	756	26.7	0
	>8	9	928		
	81	12.6	910		
3	28	5.4	932	15	0
	28	9	932		
	28	12.6	932		
4	12[1]	5.4	741	20	0
	12[1]	9	797		
	12[1]	12.6	871		
5	28	5.4	932	15.0 (curado al aire)	5.8
	28	9	932		5.9
	28	12.6	932		5
5	> 28	5.4	1112	19.0 (curado húmedo)	4.5
	> 28	9	1112		4.5
	> 28	12.6	1112		3.6
	> 28	16.2	1112		3.7
6	> 28[2]	5.4	1112	19.4 (curado húmedo)	10.5
	> 28[2]	9	1112		9.7
	> 28[2]	12.6	1112		9.8
	> 28[2]	16.2	1112		8.3
6	> 28[2]	5.4	1112	18.0 (curado al aire)	11
	> 28[2]	9	1112		10.2
	> 28[2]	12.6	1112		9.4
	> 28[2]	16.2	1112		9.4
7	> 28[2]	5.4	1112	11.5 (curado húmedo)	NA
	> 28[2]	9	1112		NA
	> 28[2]	12.6	1112		NA
	> 28[2]	16.2	1112		3.8

Tabla 13. Comparación 7 mezclas de hormigón.

1. Curado al vapor durante dos días.

2. La temperatura se elevó a 400 ºC, permaneció durante dos horas y luego se elevó al máximo nivel a la misma velocidad de calentamiento.

1 ksi = 6.9 MPa, Fahrenheit (F) to ºC = (ºF - 32)/1.8

3.3.3. Comparativa 7 mezclas de hormigón como TES

[John E.E. (2012), ref. 8] En base a los resultados del apartado anterior, se determinaron otras siete mezclas de hormigón de 100x200mm, todas ellas contenían PP y se sabía del experimento anterior que, al añadir piedra caliza como agregado, se alcanzaron altos niveles de agrietamiento y una reducción de las propiedades mecánicas después de la exposición. Las mezclas 1 y 2 tenían cemento de aluminato de calcio, mientras que las mezclas 3,4,5 y 6 usaron cemento Portland.

Material (lb/yd3)	Mezclas						
	1 *	2*	3	4	5	6	7
Cemento	2000	2000	1500	1500	1300	1300	1300
Cenizas volantes	-	-	500	500	500	500	500
Humo de sílice	-	-	-	-	200	200	200
Agregados finos	1600[2]	1600[3]	1410[3]	1410[2]	1336[3]	1336[2]	1336[4]
Agua	305	305	305	305	305	305	305
HRWR	11[1]	8[1]	8[1]	11[1]	17[1]	17[1]	18[1]
Fibras de acero	100	100	100	100	100	100	100
Fibras PP	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4

Tabla 14. Composición 7 mezclas de hormigón para TES.

* Mezclas de cemento CA, $1\frac{lb}{yd^3} = 0.593\frac{kg}{m^3}$.

1 Tasa de dosificación de onzas líquidas / 100 cwt, cwt = peso de cemento, 1 fl oz / 100 lb = 65,2 mL / 100 kg.

2 Arena del río Arkansas.

3 Sienita (tamaño agregado máx. 2,35 mm).

4 Sienita (tamaño agregado máx. 4,50 mm), 1 pulg. = 25,4 mm.

Las pruebas de evaluación consistieron en 10 ciclos térmicos, en los que se calentaban las muestras a velocidad de $9\frac{ºC}{\text{min}}$ hasta 300ºC y permanecía a esa temperatura durante 2 horas. Posteriormente a esa misma velocidad de calentamiento alcanza los 500ºC y tras 2 horas volvían a condiciones ambientales.

3.3.3.1. Efectos cíclicos sobre la resistencia residual

Se muestra en los gráficos una gran disminución de la resistencia tras el primer ciclo, y esta, se mantiene estable a partir del tercero. También destaca que las mezclas 1 y 2, las cuales contenían cemento de aluminato de calcio, retuvieron el 75% de su resistencia a compresión original. Las mezclas que contenían cemento Portland fueron menos resistentes, lo cual se

atribuye a que a altas temperaturas se descompone el hidróxido de calcio para formar CaO (cal libre), cuya hidratación por la humedad del aire hace que el hormigón se vuelva inestable. La mezcla 3 retuvo el 40% de su resistencia y las mezclas 4,5,6 y 7 del 50-55% de esta. Por otro lado, el coste de las mezclas 1 y 2 era del doble que el de las otras cinco mezclas, por lo que su uso solo se justificaría si tuviesen unas propiedades térmicas mucho mejores.

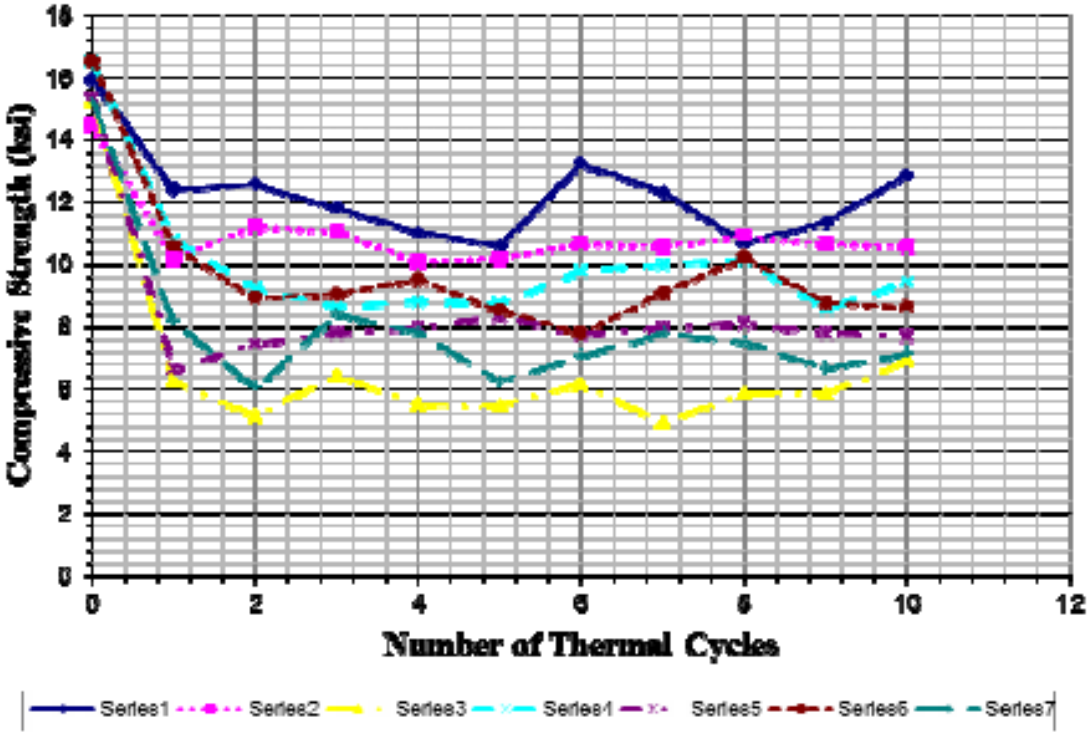


Figura 33. Resistencia/número de ciclos de 7 mezclas de hormigón.

3.3.3.2. Efectos cíclicos sobre el peso unitario

El peso de las siete muestras antes de los ciclos térmicos era de 150 $\frac{lb}{ft^3}$ y todas tuvieron un 9% de reducción de peso tras el ciclo térmico. Este es un parámetro importante para calcular con precisión la energía almacenada en el interior de una masa de volumen de hormigón., por lo que esta reducción deberá tenerse en cuenta posteriormente diferentes cálculos.

3.3.3.3. Efectos cíclicos en la conductividad térmica

La conductividad térmica medida en las mezclas que contenían aluminato de calcio fue de un 33% mayor que en las demás mezclas evaluadas, siendo la conductividad de la mezcla 2 un 12% mayor que la de la mezcla 1. La conductividad térmica depende entre otros del tipo de cemento y de los agregados añadidos, los cuales tienen un efecto favorable en el aumento de esta. Se atribuye una mayor conductividad de las mezclas 1 y 2 debido al contenido de agregado grueso de estas, siendo este de entre un 15-20% más de agregado que el contenido en las otras mezclas de la evaluación. También, se concluye que la adición de humo de sílice y cenizas volantes penaliza la conductividad térmica en los módulos de hormigón. La diferencia entre las mezclas 1 y 2, fue que la mezcla 2 contenía agregado de granito, el cual tiene una conductividad entre 1,7 - 4,0 $\frac{W}{m*K}$, la cual es considerablemente mayor que la conductividad térmica de la arena de río 0.25 - 2.0 $\frac{W}{m*K}$. Tras los ciclos térmicos se comprobó la conductividad térmica en las mezclas 1, 4 y 6 y se estimó en las otras cuatro, teniendo en cuenta que la estimación en las mezclas 1, 4 y 6 tuvo un error de entre el 10-20%, siendo este significativo a la hora de confiar en la veracidad de las demás estimaciones.

3.3.3.4. Efectos cíclicos en el calor específico

No se observó una tendencia general respecto al calor específico de las muestras que osciló entre 0,720-0,920 $\frac{J}{g*K}$. El calor específico de la muestra 6 disminuyó un 9% y el de mezcla 4 aumentó un 5%, lo cual fue una anomalía debido a que se encontró en la literatura que el hormigón con agregado de silíceo debería disminuir su calor específico tras temperaturas elevadas.

3.3.3.5. Efectividad de las mezclas como TES

Las 7 mezclas podían usarse como material para TES, siendo además la conductividad mayor que la del hormigón usado en la Plataforma solar de Almería. Sin embargo, los altos precios podían hacer que este material no fuese rentable. Los precios del cemento de aluminato de calcio y de las fibras de acero fueron de $ 0.58 / kg y $ 6.10 / kg, siendo el cemento de aluminio considerablemente más resistente que el cemento Portland pero 6 veces más caro que este. En las mezclas 3-7 las fibras de acero sumaron $ 277,00 / yd^3 adicionales al precio de estas frente a los $ 150,00 / yd^3 que costarían sin estas. Se comprobó la conductividad térmica excluyendo las fibras de acero y utilizando el doble de estas, el resultado fue una disminución de la conductividad del 18% si no se utilizaban y un aumento del 16% si se utilizaba el doble, por lo que su uso estaría justificado. Por el contrario, el uso de cemento de aluminato de calcio no estaría tan justificado, ya que aun teniendo las mezclas 1 y 2 conductividades un 33% mayores que las demás, sus costos son del doble de las demás mezclas y sus resistencias similares a las de las mezclas 4 y 6. En la tabla 10 se muestra esquemáticamente lo comentado en los anteriores apartados.

Se recomienda finalmente el uso de una mezcla con aproximadamente $1500\frac{lb}{yd^3}(890\frac{kg}{m^3})$ de cemento Portland, un 15% de humo de sílice y un 30% de reemplazo de cenizas volantes Tipo C y alrededor de 30-50 lb / yd 3 de fibras de acero para mejorar el comportamiento de post-fisuración. La relación de agua/materiales cementíceos ($\frac{w}{cm}$) debe ser entre 0.2 y 0.25, cantidad de reductor de agua adecuado para mejorar la trabajabilidad. La proporción de cemento-agregados debe estar en el rango 1:1 a 1:4 y tamaño máximo de estos no debe superar los 6.35 mm, considerando granito una opción adecuada. Por último, es importante que la mezcla contenga unos $2\frac{kg}{m^3}$ de fibras de polipropileno multifilamento.

Propiedades	Mezclas							
	1		2		3		4	
	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después
Peso $\frac{lb}{ft^3}$	152	137	152	137	150	135	150	135
Cp medido $\frac{Btu}{lbm.ºF}$	0.172	-	0.198	-	0.203	-	0.196	0.179
Cp calculado $\frac{Btu}{lbm.ºF}$	0.198a 0.234b	-	0.205a 0.240b	-	0.206a 0.244b	-	0.199a 0.237b	-
Conductividad térmica $\frac{Btu}{ft.h.ºF}$	1.45	1.132 1.231	1.62	1.302	1.1	0.782	1.16	0.841 1.042
Apariencia de grietas	Ninguna		Ninguna		Pocas microgrietas		Pocas microgrietas	
Coste ($\frac{\$}{yd^3}$)	895		895		397		397	

Tabla 15. Comparativa general 4 mezclas de hormigón para TES.

Propiedades	Mezclas					
	5		6		7	
	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después
Peso($\frac{lb}{ft^3}$)	150	135	150	135	150	135
Cp medido ($\frac{Btu}{lbm.ºF}$)	0.22	-	0.177	0.186	0.196	-
Cp calculado ($\frac{Btu}{lbmºF}$)	0.207a 0.246b	-	0.200a 0.239b	-	0.207a 0.246b	-
Conductividad térmica ($\frac{Btu}{ft.h.ºF}$)	0.983	0.6652	1.27	0.9542 0.8903	1.21	0.896
Apariencia de grietas	Muchas microgrietas		Pocas microgrietas		Muchas microgrietas	
Coste ($\frac{\$}{yd^3}$)	415		415		415	

Tabla 16. Comparativa general 3 mezclas de hormigón para TES.

1 Después de 10 ciclos térmicos entre temperatura ambiente y 932ºF (500ºC), Fahrenheit (F) a ºC = (ºF - 32)/1.8, 1 $\frac{\text{Btu}}{\text{lbºF}}$ = 4.1868$\frac{J}{g*K}$, 1 $\frac{\text{Btu}}{\text{ft.h.ºF}}$ = 1.73 $\frac{W}{m*K}$, 1 $\frac{lb}{ft^3}$= 16.02 $\frac{kg}{m^3}$

2 Estimada en el estudio.

3 Después de 30 ciclos térmicos entre temperatura ambiente y 932ºF (500ºC)

a Calculada en el estudio con Cp del agua = 0.5255 $\frac{\text{Btu}}{\text{lbºF}}$

b Calculada en el estudio con Cp del agua =0.9984 $\frac{\text{Btu}}{\text{lbºF}}$

3.3.4. Mezclas para sales

[John E.E. (2012), ref. 8] Si bien en el artículo de estudio utilizado para la redacción de este apartado no se estudia el hormigón como medio de almacenamiento de energía térmica en sí mismo, resulta muy interesante el análisis de las propiedades de 26 mezclas de hormigón con la finalidad de ser usadas para el almacenamiento de sal fundida en un tanque termoclina hecho de hormigón. El objetivo es evaluar la resistencia y estabilidad del hormigón a temperaturas de 600ºC y su compatibilidad con sal fundida compuesta de una mezcla eutéctica de 40% en peso de nitrato de potasio (KNO_3) y 60% de nitrato de sodio ($NaNO_3$) a altas temperaturas. Se muestra a continuación la composición de las 26 mezclas estudiadas en esta investigación, siendo los elementos que lo componen: cemento, humo de sílice, agregados finos y agregados gruesos, agua, fibras de polipropileno y reductor de agua de alto rango.

$\frac{kg}{m^3}$	Cemento	Cenizas volantes	Humo de sílice (SF)	Agregados finos	Agregados gruesos	Agua	Fibra PP	Agua/ materiales cementíceos	HRWR
1	400	400	–	1005	–	288	2	0.36	-
2	236	550	–	1100	–	236	2	0.3	-
3	480	320	–	1160	–	240	2	0.3	-
4	400	320	80	1130	–	240	2	0.3	-
5	265	265	–	771	7712	192	2	0.36	-
6	237	237	–	741	7412	237	2	0.5	-
7	160	374	–	741	7902	181	2	0.34	-
8	142	332	–	756	7562	214	2	0.45	-
9	320	214	–	771	7912	197	2	0.37	-
10	285	190	–	750	7502	237	2	0.5	-
11	214	320	–	762	7622	193	2	0.36	-
12	190	285	–	732	7342	237	2	0.5	-
13	214	267	54	762	7622	192	2	0.36	-
14	190	237	48	732	7342	237	2	0.5	-
15	400	400	–	1173	–	224	2	0.28	1.2
16	400	320	80	1131	–	240	2	0.3	2.4
17	107	249	–	633	11271	171	2	0.48	–
18	107	249	–	633	11272	171	2	0.48	–
19	193	174	19	688	10081	193	2	0.5	–
20	200	180	20	652	10083	200	2	0.5	–
21	178	160	18	640	11272	178	2	0.5	–
22	386	–	–	874	8902	193	2	0.5	–
23	193	193	–	688	10082	193	2	0.5	–
24	193	193	–	688	10083	193	2	0.5	–
25	193	193	–	688	10081	193	2	0.5	–
26	–	–	–	–	–	140	2	–	30

Tabla 17. Composición de 26 muestras de hormigón.

De la tabla anterior es necesario aclarar los siguientes puntos:

- Los agregados gruesos de las mezclas 5-14, 18 y 21-23 tenían un tamaño máximo de grano de 12.7 mm.
- Los agregados gruesos de las mezclas 17,19 y 25 estaban compuestos de arena silícea con un tamaño máximo de grano de 9.5mm
- Los agregados gruesos de las mezclas 20 y 24 se componen de sienita un HRWR (reductor de agua de alto rango).
- La mezcla 26 es una mezcla de hormigón patentada, de la que no se sabe su composición.
- Las mezclas también contenían fibras de polipropileno (PP) de diámetro de 18 µm y longitud de 12.7 mm para prevenir la formación de astillas o explosiones en el material.

Las 26 mezclas fueron sometidas a 30 ciclos entre 300 y 600ºC. En cada ciclo cambió de temperatura a 9ºC/min y se estableció durante 6 horas en cada extremo del rango de temperaturas.

Mezclas	Resistencia a compresión (MPa) Antes-después	Porcentaje de resistencia retenida	Densidad Antes-después $\frac{kg}{m^3}$	Precio $\frac{\$}{m^3}$	Conductividad térmica $\frac{W}{m*K}$	Calor específico previsto Cp=4.18 kJ/(kg*K)
1	72-21	29	2163-1906	340	1.65	1.193
2	65-20	31	2163-1906	241	2.15	1.101
3	72-23	32	2163-1906	399	2.09	1.097
4	65-21	32	2163-1922	372	1.94	1.101
5	50-9	16	2275-2019	285	1.9	1.080
6	32-5	16	2275-2067	262	2.2	1.160
7	37-19	51	2275-2099	217	2.41	1.068
8	25--5	20	2275-2099	203	2.28	1.122
9	56-17	30	2275-2051	321	2.3	1.084
10	36-9	25.01	2275-2051	292	2.13	1.160
11	48-14	29	2275-2067	250	1.89	1.084
12	21--6	29	2275-2051	230	N / A	1.164
13	37-6	16	2275-2067	267	2.2	1.084
14	16--3	19	2275-2067	245	N / A	1.164
15	73-23	32	2243-2003	124	N / A	1.072
16	68-20	29	2243-2003	149	N / A	1.101
17	30--6	20	2275-2083	177	N / A	1.076
18	34-8	24	2275-2083	177	N / A	1.076
19	54-N/A	–	2339-2131	130	N / A	1.101
20	36-N/A	–	2307-2099	130	N / A	1.055
21	43-12	28	2323-2115	131	N / A	1.084
22	34-5	15	2323-2115	141	N / A	1.080
23	24--6	25	2323-2115	124	N / A	1.101
24	28-N/A	–	2323-2115	124	N / A	1.043
25	41-7	17	2323-2115	124	N / A	1.101
26	158-109	69	2531-2403	510	2.99	–

Tabla 18. Características de 26 muestras de hormigón.

Muchas de las mezclas fueron acondicionadas antes del ciclo térmico, el acondicionamiento consistía en calentar las muestras hasta 110ºC a 0.17ºC/min y hasta 600ºC a 0.67ºC/min. Las mezclas 7, 9 y 10, mejoraron significativamente su resistencia a la compresión, sin embargo, en los demás casos se observó una mínima mejoría.

Al final del experimento se pudieron sacar las siguientes conclusiones:

- La adición de humo de sílice a las de mezclas de aluminato de calcio y cenizas volantes no aumenta la resistencia a compresión ni a temperaturas elevadas en el hormigón.
- Las mezclas con una proporción de materiales cementosos y agregados finos 1: 1.4, retuvieron un 33% de su resistencia a compresión.
- Las muestras de aluminato de calcio, cenizas volantes y 10% de humo de sílice no tuvieron diferencias en su resistencia a compresión residual tras los ciclos de temperatura.
- Las mezclas de aluminato de calcio y cenizas volantes requieren más de 800 $\frac{lb}{yd^3}$ llegar a resistencias a compresión superiores a 28 MPa.
- El acondicionamiento del hormigón antes de los ciclos afecta a su resistencia a compresión residual.

- Por lo general, el hormigón presentó una gran pérdida de resistencia si se calentaba en presencia de sal fundida. Sin embargo, las mezclas de cemento Portland y cenizas volantes tuvieron gran resistencia.
- Las mezclas que usan cemento Portland y agregado grueso se ablandan más rápido en presencia de sal fundida que las de aluminato de calcio y arenisca.
- Las mezclas de alta densidad mostraron menos del 40% de pérdida de conductividad térmica tras los ciclos térmicos.
- Las mezclas de hormigón de aluminato de calcio y cemento Portland con menos de 1300 $\frac{lb}{yd^3}$ redujeron su conductividad en más del 50% después de los ciclos térmicos.
- Un alto contenido de agregados, especialmente agregados gruesos, conllevará a una mayor reducción del calor específico y generalmente fue menor del 20%.

3.4. Aplicaciones alternativas

[Laing, D. et al. (2011), ref. 1] Se planteó un sistema de almacenamiento de calor para la generación direta de vapor combinando el almacenamiento térmico en hormigón y PCM. Fueron definidas tres partes para almanenar la energía solar, mientras el hormigón se utiliza para almacenar el calor sensible, se utiliza un PCM para la evaporación en dos fases. Este sistema se construyó en Carboneras (España) y tiene una capacidad total de 1 MWh. EN la siguiente figura se observa la curva temperatura-entalpía de una planta solar térmica con HTF monofásico, comparada como la combinación aquí propuesta, usando los módulos de hormigón para precalentar y sobrecalentar, lo cual aumenta la eficiencia disminuyendo las diferencias de temperaturas entre el material de almacenamiento y el fluido.

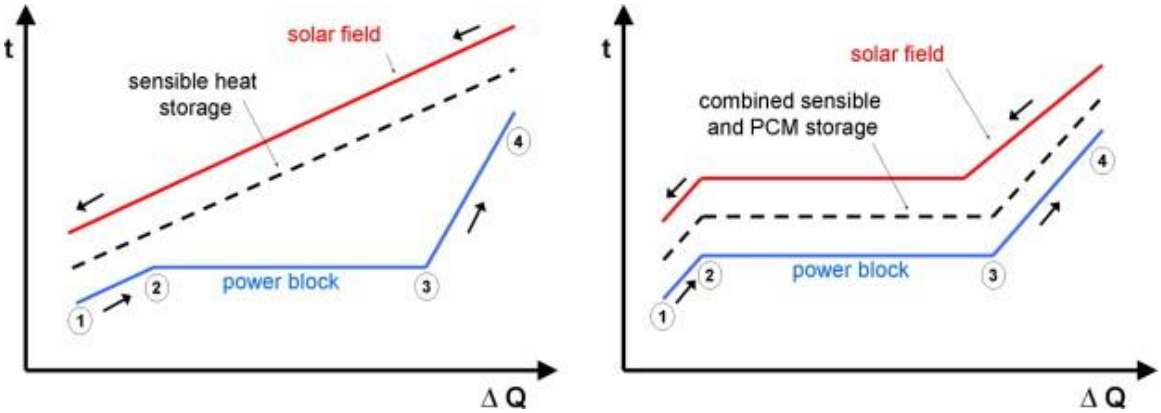


Figura 34. Curva temperatura entalpía almacenamiento PCM-Hormigón.

A una presión de 100 bar, se destina el 70% de la energía almacenada para el cambio de fase de agua a vapor, por lo que el PCM tendrá la mayor capacidad. Como se observa en la siguiente figura, en el proceso de descarga el agua es precalentada hasta su punto de ebullición, se evapora en al almacenamiento PCM, se separa agua y vapor en el tambor de vapor y, por último, el vapor se sobrecalienta en el último bloque de hormigón.

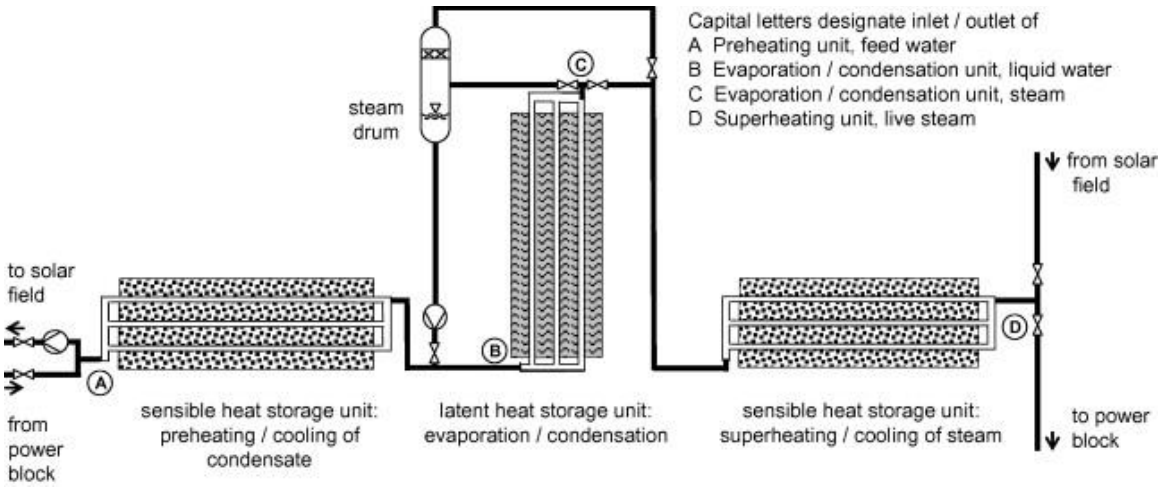


Figura 35. Esquema almacenamiento PCM-Hormigón.

Finalmente, debido a que predomina el calor necesario para el sobrecalentamiento frente al precalentamiento, se construyó un solo módulo de hormigón con el que se podía sobrecalentar vapor y precalentar agua. Las dimensiones de este módulo son de 12,60x1,32x1,35m y la distancia de los tubos de 100x110mm con disposición triangular.

Se usa nitrato de sodio ($NaNO_3$) para el almacenamiento PCM, el cual tiene una temperatura de fusión de 306ºC. Dicho almacenamiento usa un diseño tipo Sandwich y aletas de aluminio para mejorar la transferencia de calor. El diseño del módulo se amplió a 14 toneladas de sal con capacidad de 680kW.

El módulo de hormigón se controló durante la subida de temperatura para evitar llegar al valor crítico de presión de vapor, posteriormente se calentó hasta casi 400ºC. Se hicieron diferentes pruebas para comprobar las simulaciones de tanto la temperatura como el flujo másico como la temperatura, los cuales fueron casi similares a los resultados experimentales para el módulo de hormigón. Sin embargo, para el almacenamiento PCM no fueron tan exactas, atribuyendo la diferencia a fallos en los equipos de medida, pérdidas en las tuberías recirculación de vapor, bomba o tambor de vapor. Para mantener el flujo de vapor constante en la descarga, $0{,}5\,\frac{kg}{s}$ en este caso, es necesario usar vapor recirculado. Posteriormente se estimó el tamaño de un sistema TES de capacidad térmica 1100MWh, proporcionando un flujo másico de $50\,\frac{kg}{s}$, con un 87% de eficiencia.

3.5. Configuraciones

En este apartado se tratará el efecto de diferentes configuraciones en un módulo de hormigón, se tratará en un primer apartado el efecto de las aletas en este tipo de sistemas y el efecto de colocar diferentes módulos en serie o paralelo en un segundo apartado.

3.5.1. Efecto de las aletas

[Prasad, L. et al. (2013, ref. 13] Para aumentar la conductividad térmica del hormigón se propuso colocar aletas en el exterior de los tubos. Se comparó la diferencia en los tiempos de carga de un módulo de almacenamiento sin aletas, con 4 aletas y con 6 aletas. Las reducciones en el tiempo de carga con 4 y 6 aletas fueron del 35,48% y 41,41%.

Con el número de aletas, aumenta la tasa de almacenamiento de energía debido a un aumento de la conductividad y, aunque la adición de aletas también reduce el volumen de almacenamiento efectivo del hormigón, esta reducción no es significativa, siendo del 2.6% y 3.37% para 4 y 6 aletas, por lo que la adición de estas sería beneficiosa. Las aletas, además

dan resistencia y actúan como aglutinante en el módulo de hormigón, por lo que reducirá el costo de aditivos para evitar el desconchado del hormigón.

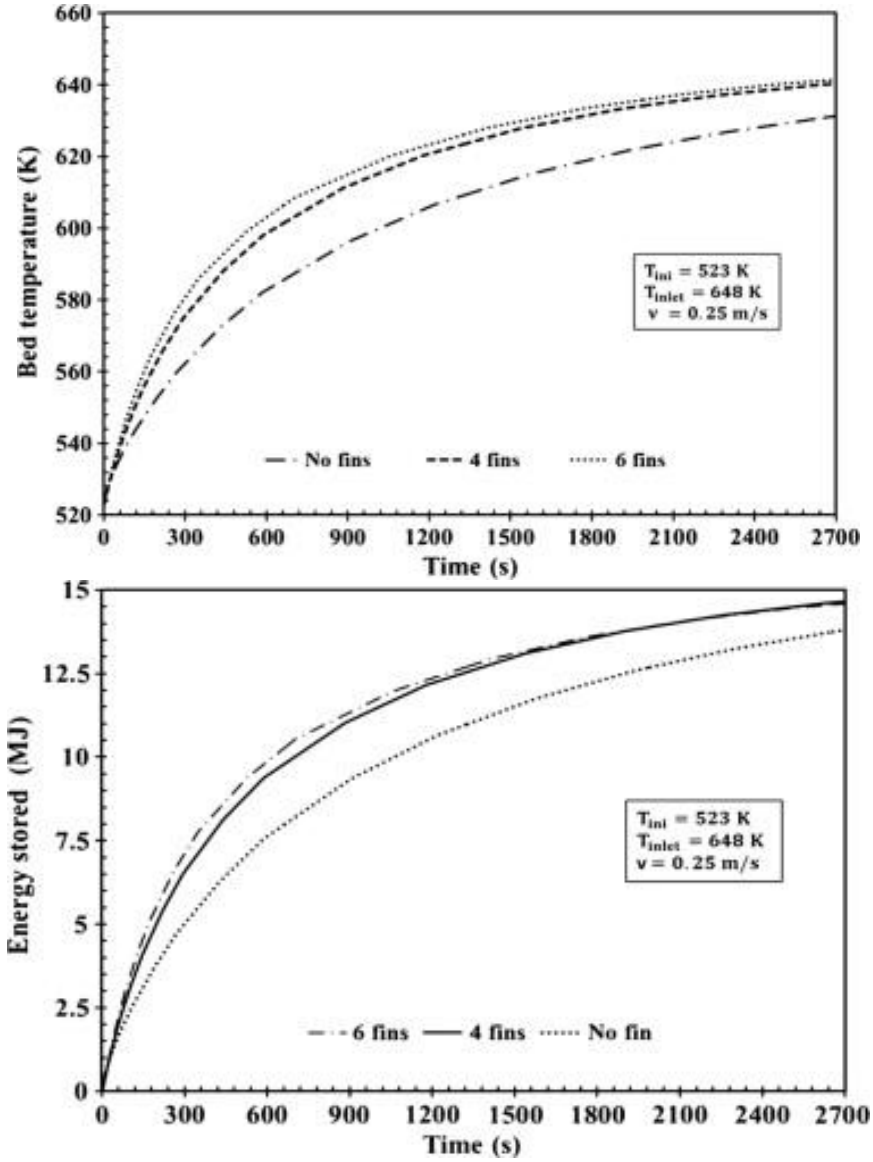


Figura 36. Influencia de las aletas en la temperatura y la energía térmica almacenada.

3.5.2. Configuración de los módulos

La distinta configuración de los módulos de hormigón puede tener diferentes efectos en el rendimiento de estos, por ello se hace un análisis investigando configuraciones complejas, tratando de identificar la más apropiada según los casos. Al colocar un mayor número de elementos en serie o paralelo la energía térmica intercambiada aumenta, aunque dicho aumento no es proporcional al número de elementos. Al poner en serie un elemento adicional, la energía térmica intercambiada por este segundo bloque será menor que la intercambiada por el primero debido a una menor temperatura del aceite de entrada, y además aumentan las caídas de presión. Si el elemento adicional es colocado en paralelo, la energía total también aumenta, pero menos que si lo colocásemos en serie y en cada bloque hay menores caídas de presión debido al menor caudal másico que circula por el bloque. Por lo tanto, al fijar la caída de presión y el caudal másico de circulación, si aumentaba el número de módulos, se veía también incrementado el número de módulos en serie en cada rama. También queda demostrado que la energía total aumenta con el número de ramas, pero llegados a un punto

toma un valor asintótico por lo que esas configuraciones no estarían justificadas. En este estudio para un caudal de 500 $\frac{kg}{h}$ y 5 bar de caída de presión se llegó a una configuración óptima de 2 ramificaciones en paralelo con 44 módulos en serie cada una, pero no se entrará en detalles de cálculos debido a que cada caso tendrá una configuración óptima diferente. A continuación, las fórmulas para la caída de presión utilizadas en el experimento:

$$f = \frac{64}{Re} \ (Flujo\ laminar)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log(\frac{e}{3.7 * D_{int}} + \frac{2.51}{Re * \sqrt{f}} \ (Flujo\ turbulento)$$

$$\Delta p = f * \frac{L}{D} * \rho * \frac{v^2}{2}$$

3.6. Optimización de costos

[Jian, Y. et al. (2015), ref. 10] En esta investigación se optimiza la fabricación de un módulo de hormigón de alta temperatura que usa Therminol VP-1 como HTF. Se desarrolla una solución analítica mediante el método de la transformada de Laplace para optimizar el diseño de un módulo de hormigón. Para ello se hacen los siguientes supuestos:

- El calor se distribuye uniformemente por cada tubería del módulo, por lo que se puede estudiar únicamente una de ellas.
- Se desprecia la transferencia de calor en dirección axial tanto en el sólido como en el fluido.
- Se puede despreciar la conductividad térmica del tubo.
- No hay pérdidas de calor durante la carga y descarga.

En este estudio se da especial importancia a la cantidad de energía liberada por el módulo de almacenamiento y a la temperatura de salida del fluido. En la siguiente imagen se muestra un análisis de la cantidad de energía suministrada del sólido al fluido, en función de la velocidad de este y del tiempo de descarga con una longitud de almacenamiento de 100 m y una relación de diámetro de 8.

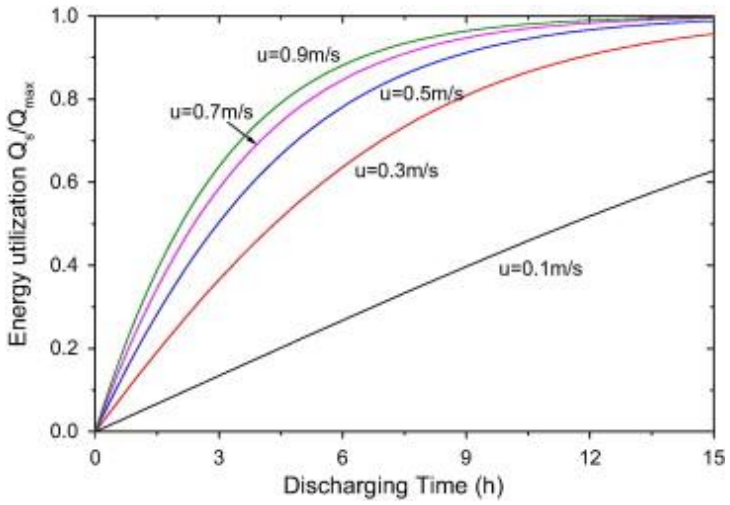


Figura 37. Energía/tiempo de descarga según la velocidad.

Se analiza que para un tiempo de 6h de descarga, al aumentar la velocidad de 0.1 a 0.5 m/s el porcentaje de la energía transferida aumenta de 26.8% a 78.1%, pero si el aumento es de 0.5 a 0.9 m/s este aumento solo será de 78.1% a 88.2%.

3.6.1. Optimización de los parámetros

El objetivo en esta investigación fue minimizar el costo de la energía por unidad de almacenamiento teniendo en cuenta los costos del sistema de almacenamiento:

- Costos de material, incluyendo material de almacenamiento, hormigón y aislamiento.
- Costos de equipo, incluyendo costos de bombas, válvulas e instrumentos para medir presión y temperatura.
- Costos de mano de obra, ya sea transporte de material, fabricación e instalación del intercambiador de calor y módulo de hormigón, y la instalación de equipos y aislamiento.
- Costos de operación, que incluye costos de electricidad.

Por tanto, diferentes parámetros de diseño tienen diferente influencia en el costo unitario de almacenamiento, el costo de material por unidad de capacidad de almacenamiento, la energía extraída, la temperatura del fluido, analizándose posteriormente, la de la relación de diámetro de la unidad de almacenamiento entre la tubería y el área del módulo que le corresponde (***η***), la longitud del módulo de hormigón, la velocidad promedio de los tubos o el número de tubos. A continuación, se muestra la influencia de la relación de diámetro en los parámetros comentados:

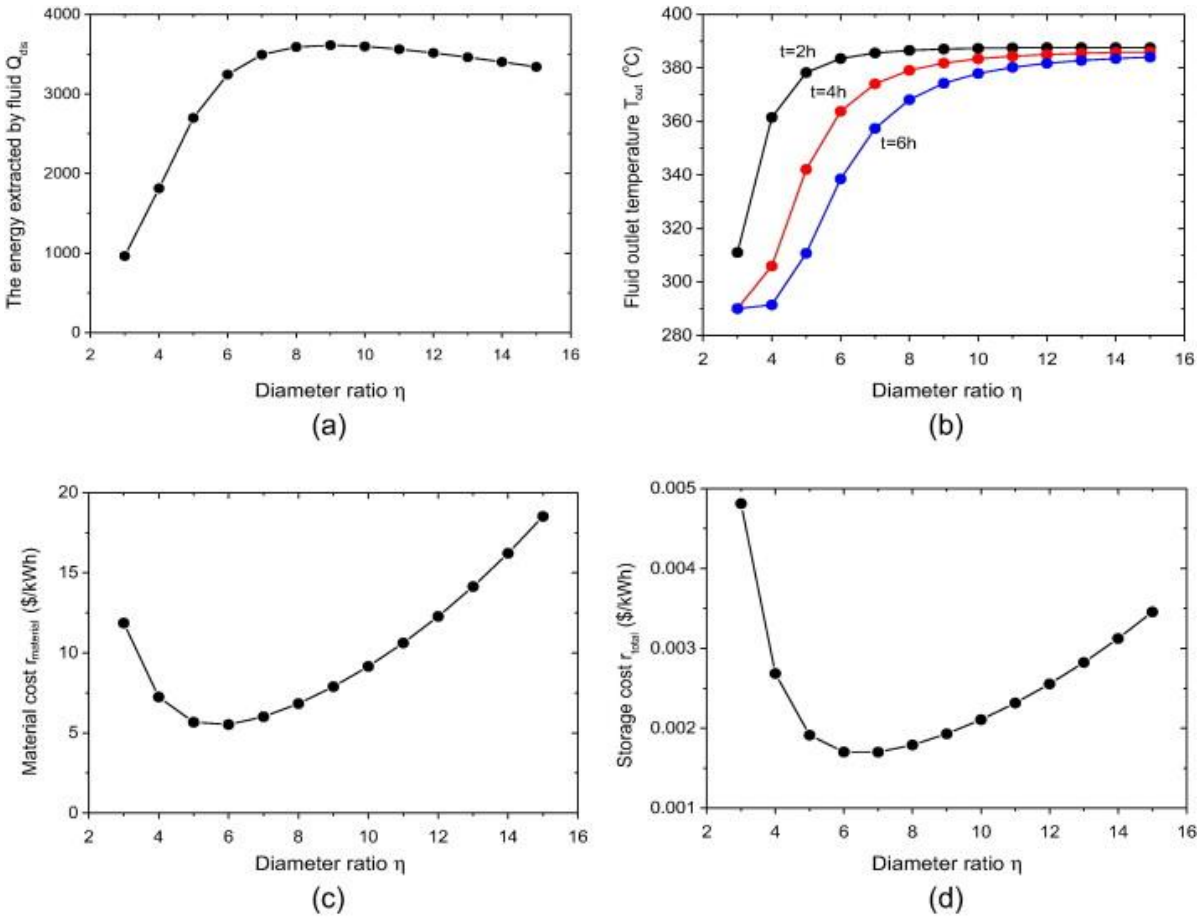


Figura 38. Influencia de la relación de diámetro en diferentes parámetros.

Se observa que para relaciones de diámetro inferiores a 6, los costes materiales y el costo unitario de almacenamiento disminuyen con la relación de diámetro. Sin embargo, para relaciones de diámetro mayores que 6, la energía absorbida aumenta poco con las relaciones de diámetro. En la siguiente figura se muestra la influencia sobre los mismos parámetros de la longitud del módulo. Al aumentar la longitud, aumenta la cantidad de material, el área de transferencia y la temperatura de salida del fluido, sin embargo, al aumentar la longitud de almacenamiento también lo hacen las pérdidas de calor y al superar los 120 metros disminuiría la energía absorbida por el fluido. El aumento del costo de material es mayor que el aumento de energía absorbida por el fluido y la energía absorbida aumenta considerablemente con la longitud mientras que la potencia de las bombas solo ligeramente, por lo que, para longitud menor de 20 metros, el costo de almacenamiento unitario disminuye con la longitud.

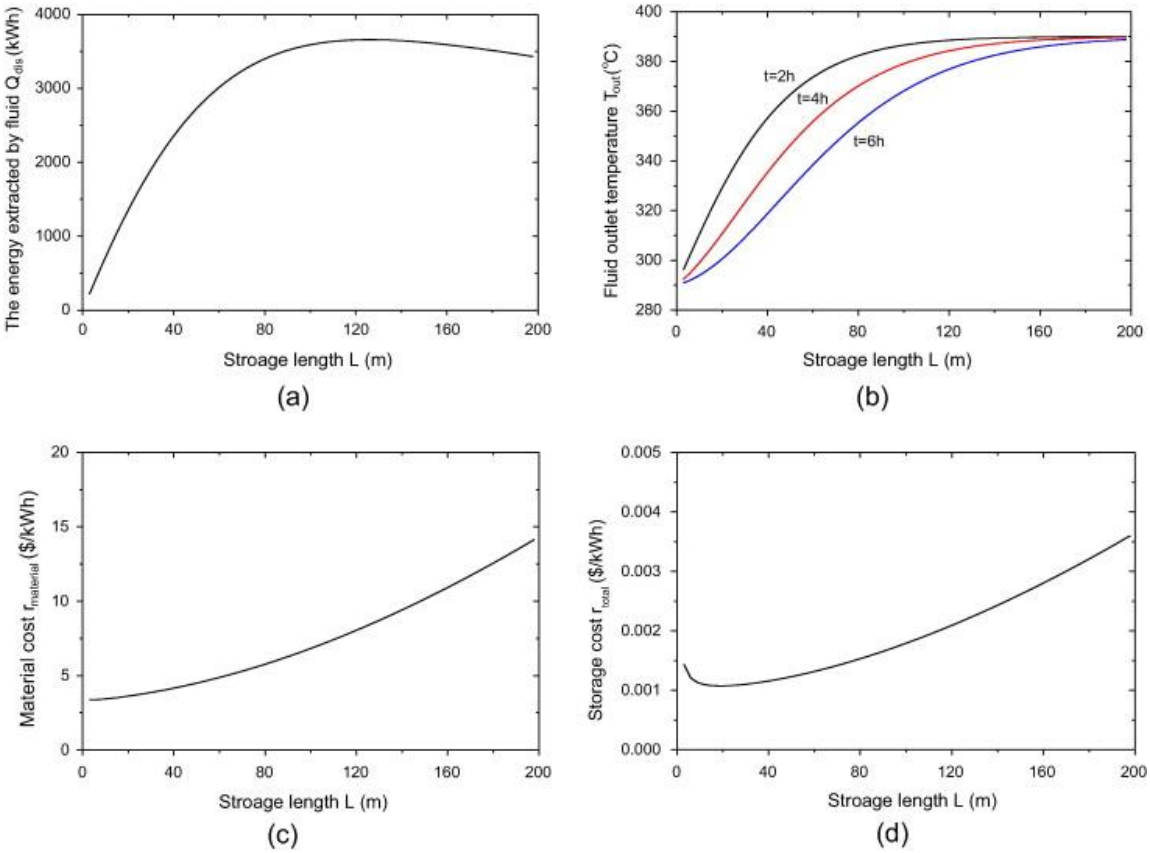


Figura 39. Influencia de la longitud del módulo en diferentes parámetros.

La siguiente figura muestra la influencia de la velocidad media del fluido. Esta mejora la transferencia de calor por convección, por lo que aumenta la energía absorbida por el fluido, pero disminuye la temperatura de salida de este disminuye. El costo de material es constante mientras aumenta la absorción de energía. Para velocidades menores a 0.2 m/s los costes de bomba y electricidad aumentan menos que la energía absorbida, por lo que la curva disminuye, posteriormente el costo de almacenamiento unitario aumenta debido a que los costos de bomba y electricidad serán mayores que la energía absorbida.

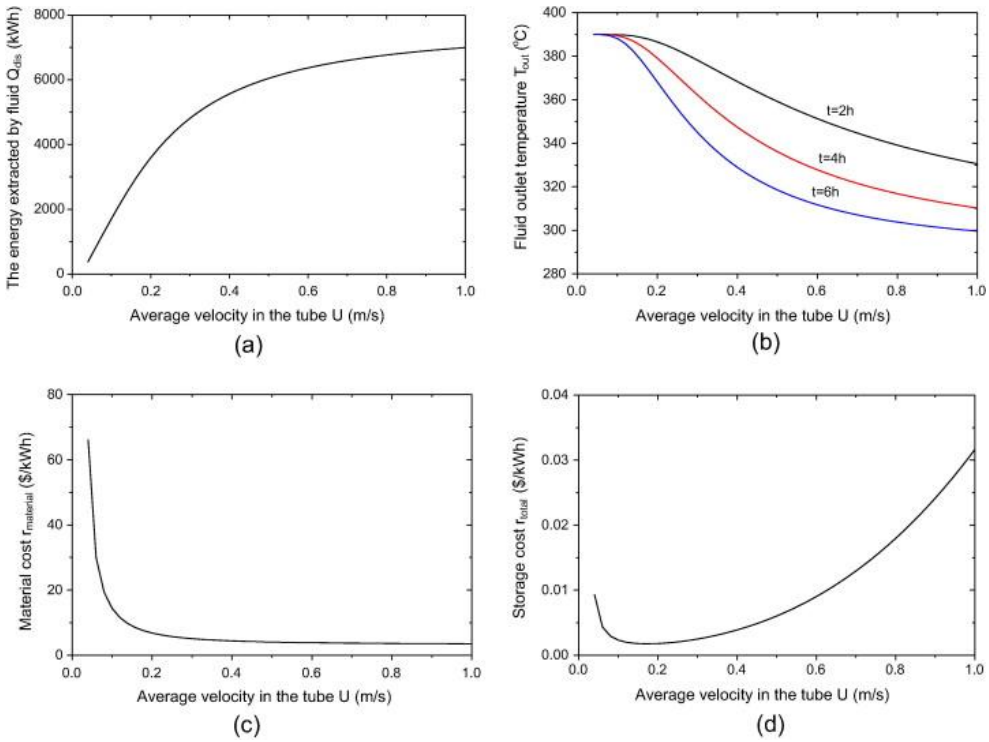


Figura 40. Influencia de la velocidad en los tubos sobre diferentes parámetros.

Por último, el número de tubos no afecta a la transferencia de calor en cada uno de ellos y la temperatura de salida es constante, mientras que la energía absorbida aumenta con el número de estos. El coste del hormigón y del material de los tubos es constante, por lo que el coste del material por unidad de capacidad de almacenamiento disminuye con el número de tubos. Los costos de electricidad de la bomba aumentan menos que los costos de material por debajo de los 30 tubos y más por encima de 30 tubos, por lo que aumenta el coste de almacenamiento unitario aumenta.

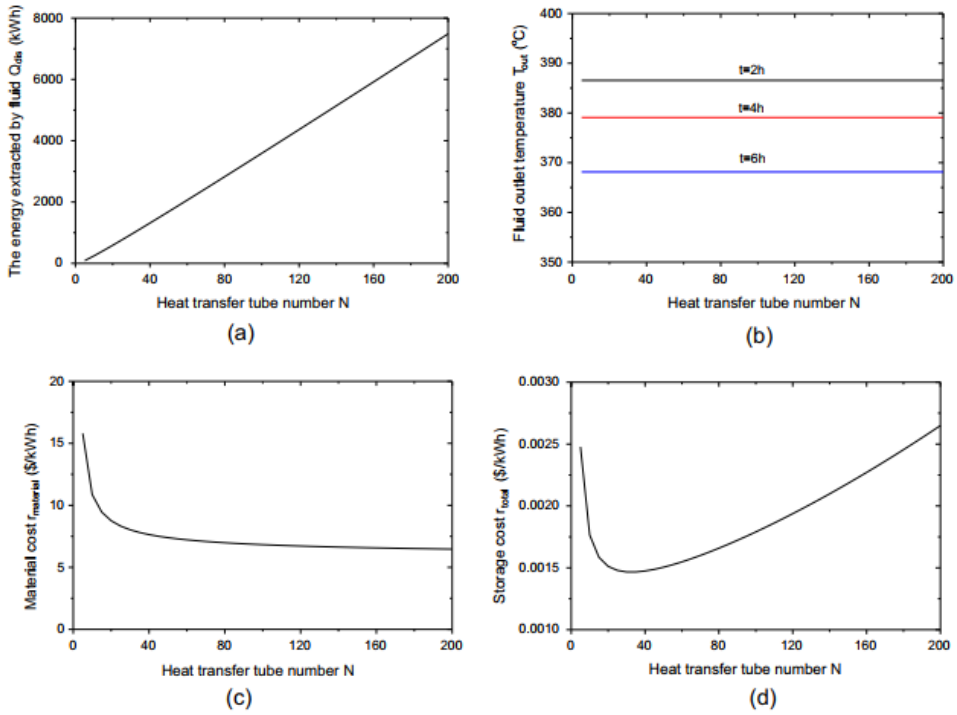


Ilustración 41. Influencia del número de tubos sobre diferentes parámetros.

3.6.2. Optimización de los costos

[Jian, Y. et al. (2015), ref. 10] Utilizando las herramientas de optimización de MATLAB, se optimizan los costos de material y totales, siendo las variables, la longitud del módulo, la velocidad media, la relación de diámetro y el número de tubos.

Primero se fija la energía descargada por el módulo de hormigón en 1000kW y la temperatura adimensional mínima de salida en 0,6. En la siguiente tabla se observa un menor coste por kWh para un diámetro interior de 16 mm. En la gráfica se observa la influencia de los costes en el coste total de la instalación y de material, estando la primera a la izquierda y la segunda a a la derecha. En ambas columnas tanto el coste del almacenamiento como del intercambiador alcanzan el 90% del total.

d_i (mm)	L (m)	U (m/s)	N	η	$r_{material}$ $(\frac{\$}{kWh})$	$r_{total} * 10^3$ $(\frac{\$}{kWh})$
16	32.9	0.0903	76	8.2	6.51	–
16	25.7	0.0671	101	8.1	–	0.97
18	36.6	0.0847	65	7.6	6.74	–
18	29.5	0.0665	82	7.5	–	0.99
20	37.9	0.0752	60	7.1	6.96	–
20	29.9	0.0581	77	7.1	–	1.01

Tabla 19. Coste por kWh según el diámetro de tubos.

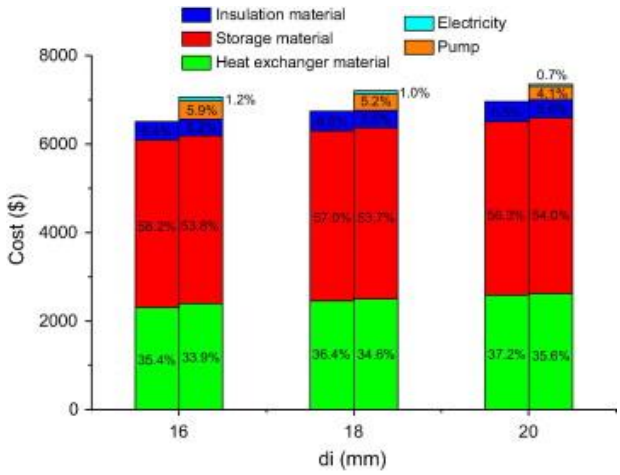


Figura 42. División de costes según el diámetro.

En la siguiente tabla se hace el mismo proceso, pero ahora fijando el diámetro interior en 16 mm y variando la temperatura mínima adimensional de salida del fluido. Al aumentar esta de 0,6 a 0,9, la longitud del módulo debe ser mayor para alcanzar una temperatura de salida más alta, y los costos aumentan con la longitud. Sin embargo, se produce un vapor de mayor calidad que mejora la eficiencia del ciclo de Rankine. Como antes, en la siguiente figura se comparan la distribución de costos a diferentes temperaturas de salida de fluido, a medida que esta aumenta, la distribución del costo de material de almacenamiento disminuye mientras que aumenta la del intercambiador de calor.

σ	L (m)	U $(\frac{m}{s})$	N	η	$r_{material}$ $(\frac{\$}{kWh})$	$r_{total} * 10^3$ $(\frac{\$}{kWh})$
0,6	32,9	0.0903	76	8.2	6.51	-
0,6	25,7	0.0671	101	8.1	-	0,97
0,7	40,4	0.0873	75	7,9	7,48	-
0,7	29,8	0.0632	102	8	-	1,11
0.8	50,6	0.085	76	7.5	8,87	-
0.8	41,2	0.0634	99	7.2	-	1,31
0,9	67,8	0.0834	79	6,9	11.3	-
0,9	53,2	0.0666	96	7.3	-	1,66

Tabla 20. Coste por kWh según temperatura mínima adimensional.

Finalmente, se comparan los costes para diferentes energías de descarga. Con la capacidad de almacenamiento aumentan la longitud de almacenamiento y la velocidad promedio, mejorando la transferencia de calor, por lo que el coste de material disminuye con la capacidad de almacenamiento. Sin embargo, los costos de bomba y electricidad aumentan con la longitud y la velocidad promedio. En la figura se comparan la distribución de costes para diferentes capacidades de almacenamiento, observándose que al aumentar estas, lo hace la distribución en costes de electricidad y se disminuye la de aislamiento. Se debe encontrar una adecuada capacidad de almacenamiento, con módulos conectados en serie o paralelo para reducir los costes.

Q_{dis} (MWh)	L (m)	U $(\frac{m}{s})$	N	η	$r_{material}$ $(\frac{\$}{kWh})$	$r_{total} * 10^3$ $(\frac{\$}{kWh})$	$R_{Material} * 10^{-3}$ (\$)	$R_{total} * 10^{-3}$ (\$)
1	32,9	0.0903	76	8.2	6.51	-	6.51	-
1	25,7	0.0671	101	8.1	-	0,97	-	7.06
5	52,6	0,1500	208	8.3	5.6	-	28,0	-
5	22,6	0.0597	521	8.2	-	0,91	-	33,0
50	113,7	0.335	871	8.3	5,00	-	249,9	-
50	14,4	0.0371	8300	8,6	-	1,39	-	506,8

Tabla 21. Costes según diferentes energías de descarga.

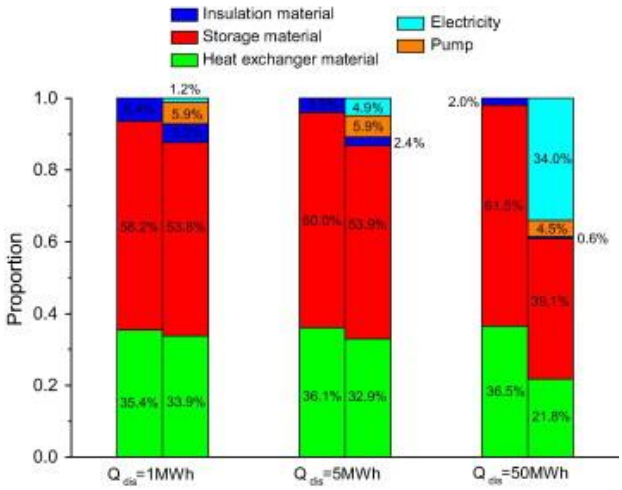


Figura 43. Distribución de costes para diferentes capacidades de almacenamiento.

3.7. Pruebas experimentales

3.7.1. Primeras pruebas

[Laing, D. et al. (2012), ref. 27] German Space Center comprobó el primer módulo de hormigón en la Plataforma Solar de Almería en 2003/2004, este primer módulo fue dañado en su fase de arranque debido a las altas presiones de vapor durante el calentamiento del hormigón fruto de una baja permeabilidad.

Posteriormente, se hizo una segunda fase del proyecto en Stuttgart (Alemania), diseñando un módulo con las siguientes características de diseño:

- Temperatura de diseño: 400 ° C.
- Fluido de transferencia de calor: Aceite térmico.
- Presión de diseño: 25 bar.
- Tiempo de carga / descarga: 6 h / 6 h.
- Largo total: 10 m
- Longitud del hormigón: 8.60 m.
- Anchura/altura: 1.70 m x 1,30 m.
- 40 cm de lana mineral para aislamiento lateral y superior.

Figura 44. Módulo sin aislamiento térmico.

El estudio se hace después de 16 meses y tras más de 270 ciclos térmicos, aplicando diferentes rutinas de prueba, en la siguiente Figura se observa el comportamiento de este en cliclos de 10 horas.

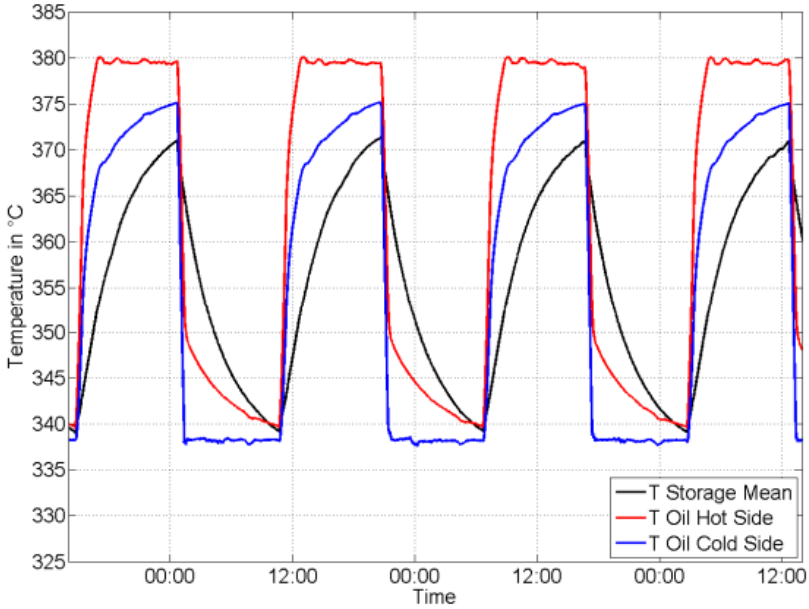


Figura 45. Temperaturas módulo de hormigón en ciclos de 10 horas.

También se establecen las pérdidas de calor en función de la temperatura experimentalmente, estableciendo posteriormente $Q(W) = 9.35 * \left(T(K) - T_{ambiente}(K)\right)^{1.201}$, la cual se refleja según la siguiente Figura:

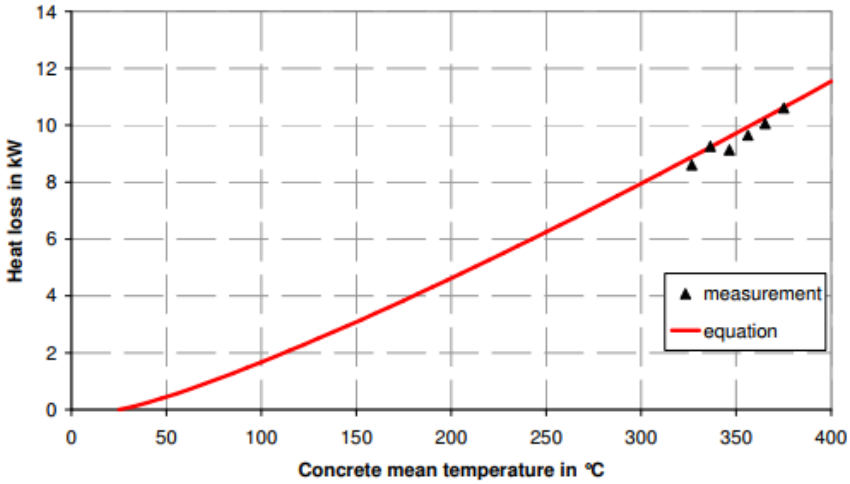


Fig. 5. Heat losses of test storage

Figura 46. Pérdidas de energía en función de la temperatura.

Para una planta termosolar cilindroparabólica de 50 MW, usando aceite térmico como fluido de trasferencia de calor, se desean 1100 MW de capacidad de almacenamiento térmico. Se requieren 50.000 m^3, que se dividen en 252 módulos de hormigón de dimensiones 4x2.6x18 m y ocupa una superficie de 300x100m. Este coste de inversión supuesto para la planta Andasol 1 tendría un coste de 38 M€.

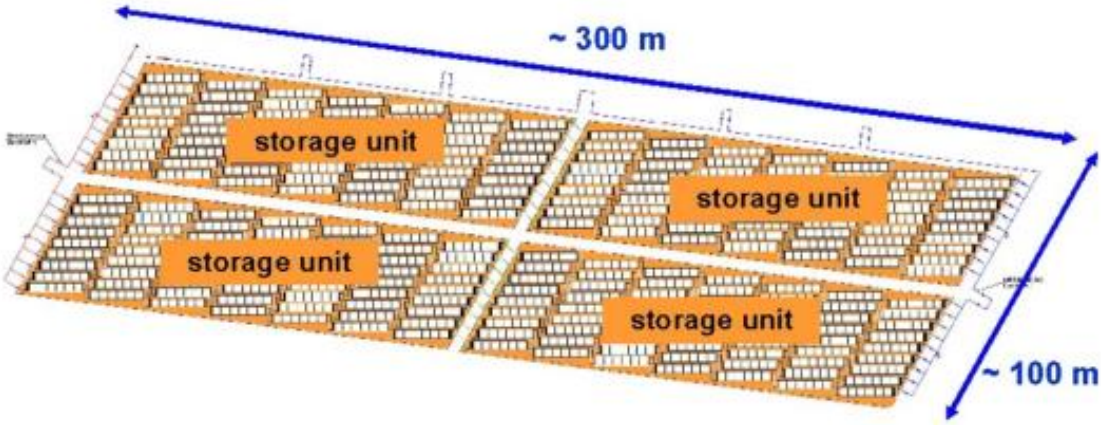


Figura 47. Propuesta almacenamiento térmico 1100MW.

Según la simulación, la planta en total genera 175 GWh en un año, de los cuales el 30% son proporcionados por el almacenamiento en hormigón, lo cual equivale a 3.500 horas de funcionamiento a plena carga. En la siguiente Figura se muestra la generación eléctrica mensual y la media anual, así como el porcentaje aportado por el sistema de almacenamiento. También se evidencia que la diferencia de energía en los meses de verano es mucho mayor que la almacenada en los meses de invierno que llega a ser casi nula.

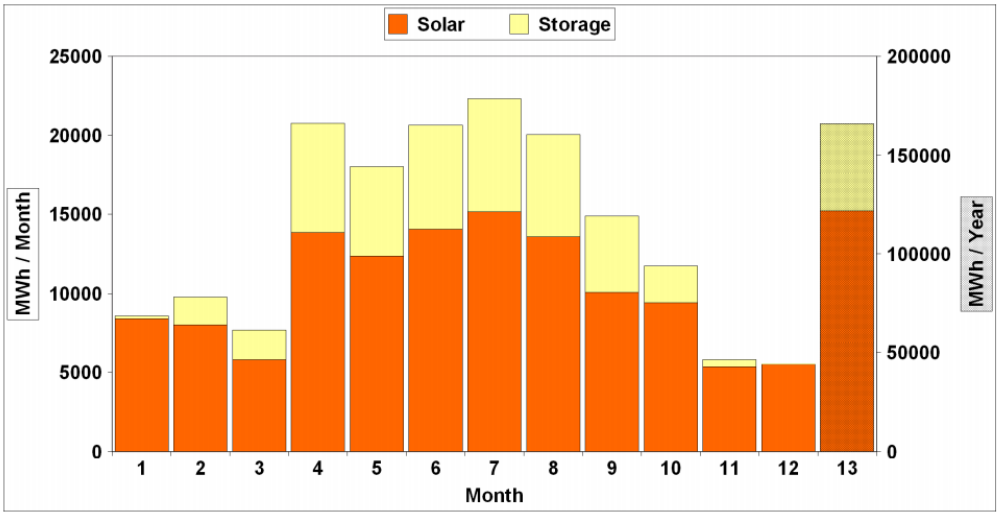


Figura 48. Energía solar y almacenada mensual y anual.

3.7.2. Pruebas más recientes

[Hoivnik, N. et al. (2013), ref. 28] Se ha probado esta tecnología en Masdar Institute Solar Plataform a temperaturas de hasta 380ºC durante 20 meses a partir de 2016. El material utilizado es una mezcla patentada llamada HEATCRETE® vp1 y aceite térmico Dowtherm-A como HTF. Tiene intercambiadores de calor de acero fundido con forma de U para reducir los gradientes de tensión en dirección axial. El almacenamiento se forma por 4 módulos de 24 elementos de 5 metros de largo en serie, cada módulo tiene una capacidad estimada de 250 kWh th.

Las propiedades de esta mezcla de hormigón difieren de las probadas hasta la fecha, ya que tiene conductividad térmica y capacidad calorífica significativamente más altas y una resistencia a compresión bastante mayor, esto permite mayor densidad de almacenamiento,

mayores cargas térmicas y una transferencia de calor más rápida. Además, al calentar hasta 450ºC, estas mezclas solo pierden un 0.73% de densidad, un 4.38% de masa, mantiene un 73% de la resistencia a compresión. Para evitar grietas y desconchados, se diseñan materiales con coeficientes de expansión térmica diferentes, se comprobaron los coeficientes de expansión térmica del hormigón y acero al carbono ASME A-106 Gr. B de las tuberías, siendo tan similares como se muestra en el diagrama. También se aporta la conductividad térmica y capacidad calorífica del material tras un tratamiento térmico a 430ºC durante 100 y 500 horas comparado con el utilizado por DLR.

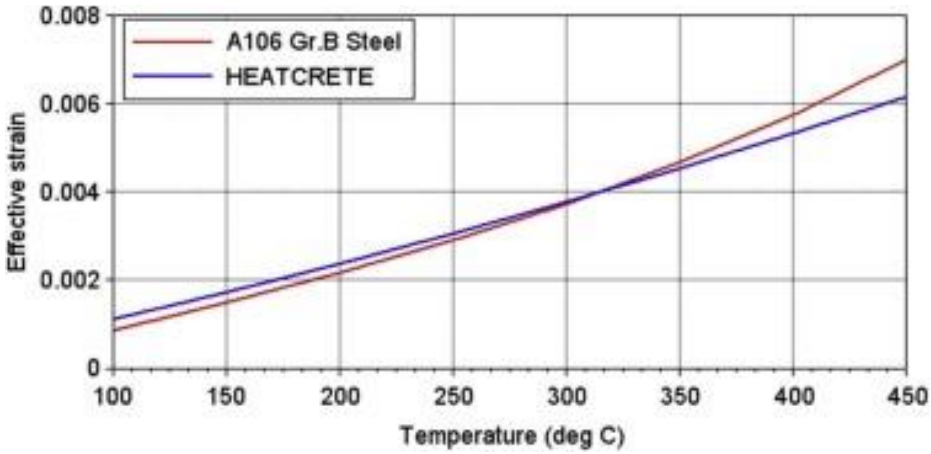


Figura 49. Coeficientes de expansión HEATCRETE y acero al carbono ASME A-106 Gr. B.

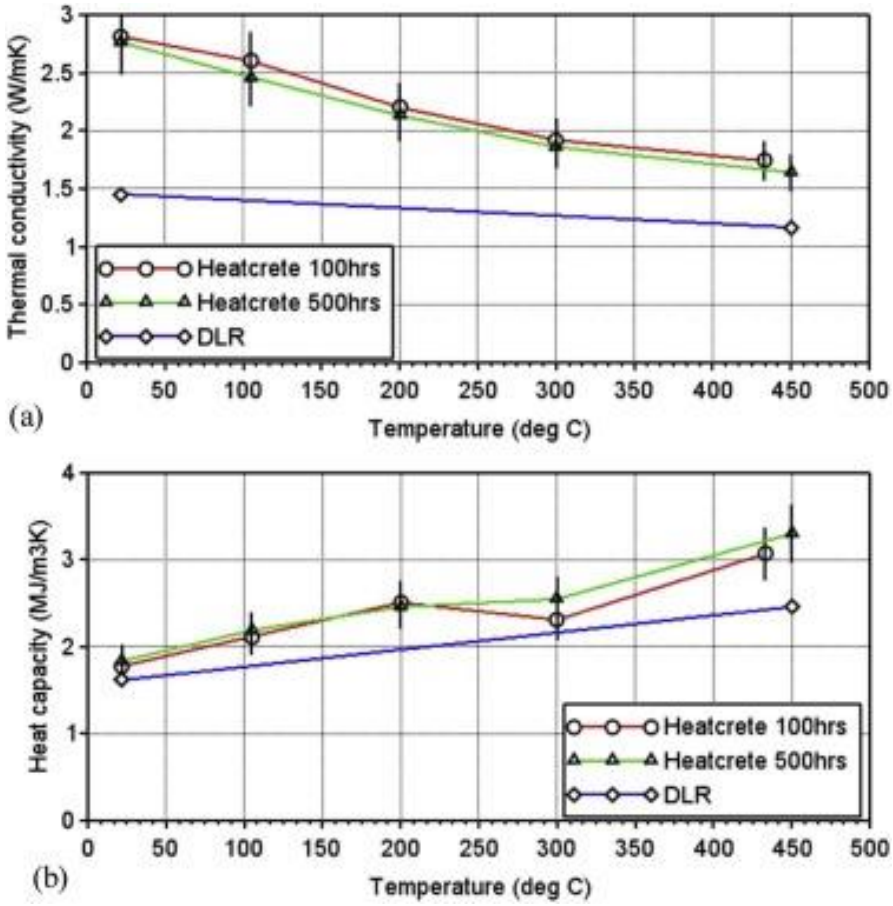


Figura 50. Conservación de las propiedades de HEATCRETE con la temperatura.

En la siguiente tabla, se muestra un resumen de las propiedades de diferentes hormigones desarrollados para almacenamiento de energía térmica:

	k [W/mK]			Cp [J/kgK]			Density [kg/m^3]	CTE 10-6	Compressive strength [MPa]	
Value at °C	25	300	400	25	300	400	400	350	25	450
Laing et al	1.45	(1.27)	1.20	720	(963)	1050	2250	11.6	29	22
Giradi et al	2.13	--	--	750	800	--	2483	13.0	34	--
Doretti et al	2.21	--	--	820	--	--	2483	--	--	--
This work (vp1)	2.81	1.92	(1.78)	790	1025	(1280)	2253	14.2	45	> 65

Tabla 22.Comparativa propiedades diferentes hormigones.

3.7.2.1. Evaluación del rendimiento a lo largo del tiempo

En esta sección se evalúa el rendimiento de los módulos a lo largo del tiempo. Los resultados muestran una ausencia de degradación del material y una estabilidad y robustez en el TES. En la figuera siguiente se observa una coincidencia similar en la temperatura en un ciclo de carga /descarga en los años 2015,2016 y 2017, de medidas experimentales con el modelo diseñado en el experimento.

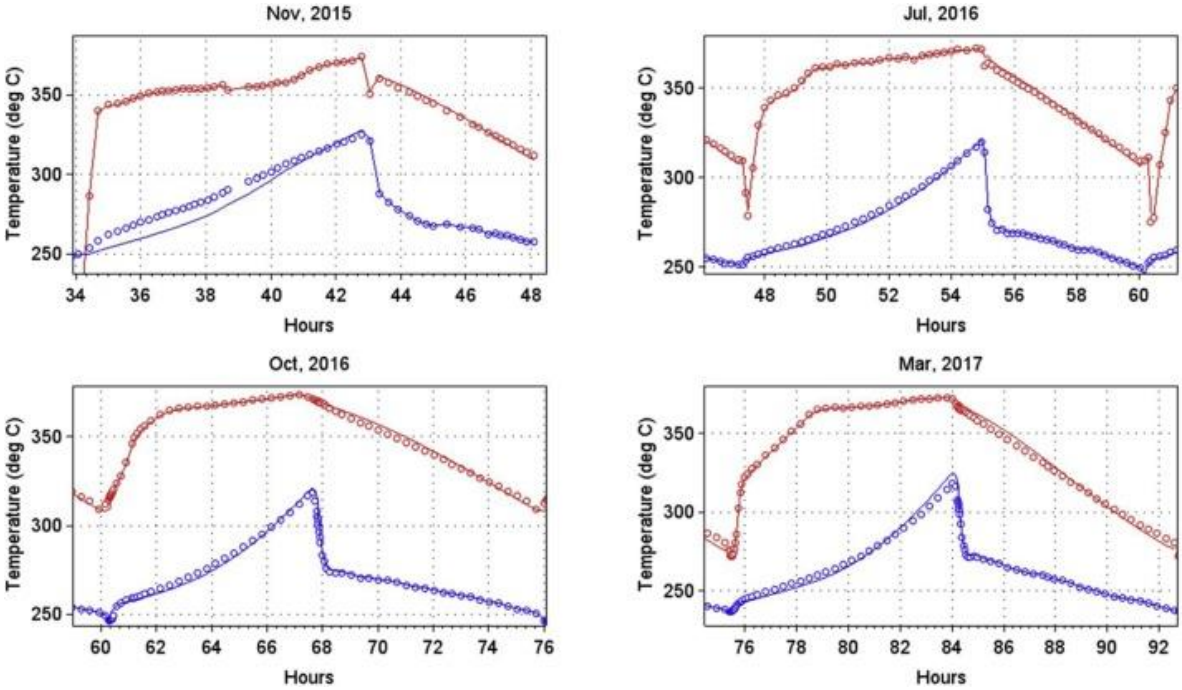


Figura 51. Respuesta entrada/salida módulo HEATCRETE en diferentes años.

Adicionalmente, se prueba el rendimiento del TES tras 6000 horas de funcionamiento, evaluando la transferencia de potencia del bloque y la energía en el almacenamiento. Esta comparativa mostrada a continuación muestra un rendimiento idéntico en los años 2016 y 2017.

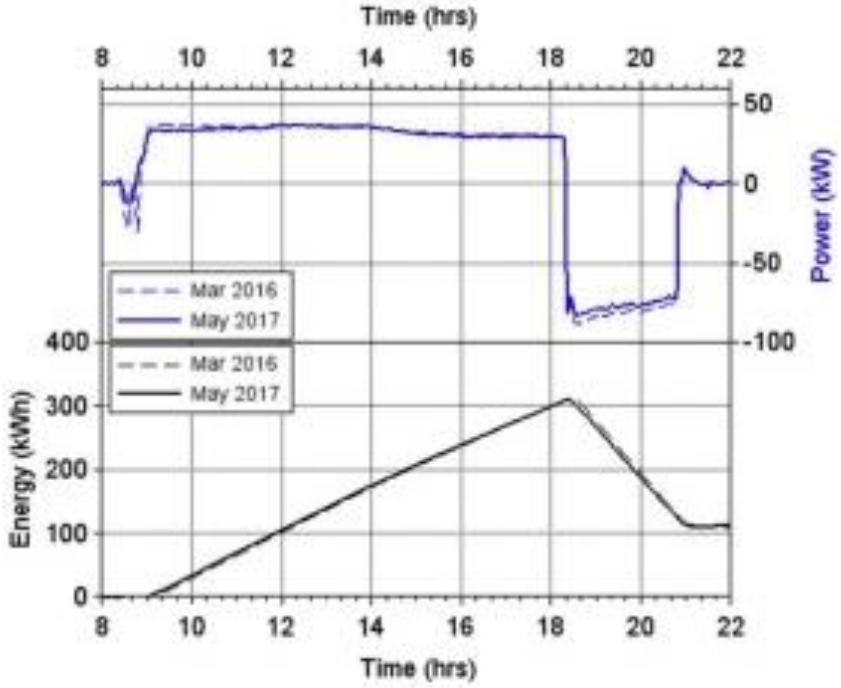


Figura 52. Comparación rendimiento HEATCRETE tras 6000 horas de funcionamiento.

Posteriormente, acabados los experimentos, se extrajeron piezas de hormigón para ser analizadas. No se observaron daños en el hormigón ni tuberías ni en la inspección inicia ni al cortarlos en elementos más pequeños, tampoco separación entre hormigón y tuberías. Las muestras también conservaban su densidad, capacidad térmica, conductividad térmica y resistencia a compresión. Tras los análisis TG (termogravimétrico), DTG (termogravimétrico diferencial) y DSC (calorimetría diferencial de barrido), se deduce que el cambio de masa tras la deshidratación inicial, entre 180ºC y 420ºC, es del 0.6% y que el material es estable hasta 450ºC donde los hidratos de calcio se empiezan a descomponer.

3.8. Modelos numéricos

Durante el desarrollo de esta tecnología se han hecho algunos estudios numéricos para simular los resultados de esta tecnología a escala real. En este apartado se presentan algunos de los modelos numéricos más recientes y validados encontrados en la literatura, con diferente dificultad y HTF probados.

3.8.1. Método de capacitancia concentrada

3.8.1.1. Aceite 0-D

[Guerra, J. et al. (2020), ref. 25] Debido a la dificultad de integración de muchos modelos numéricos en otros programas de simulación transitoria ya sea por su complejidad o por el propio alcance de estos, se presenta un enfoque de dimensión cero para modelar la respuesta térmica transitoria del sistema de almacenamiento de energía térmica en hormigón.

Se describe el problema como un sistema TES que utiliza aceite sintético como HTF, el cual fluye por un intercambiador de calor tubular de acero inoxidable 316, siendo importante el contacto directo entre el hormigón y este material debido a la diferente expansión térmica entre estos, lo cual se resuelve dejando un delgado espacio de aire o bien usando una fina capa de material intermedio, grafito, por ejemplo.

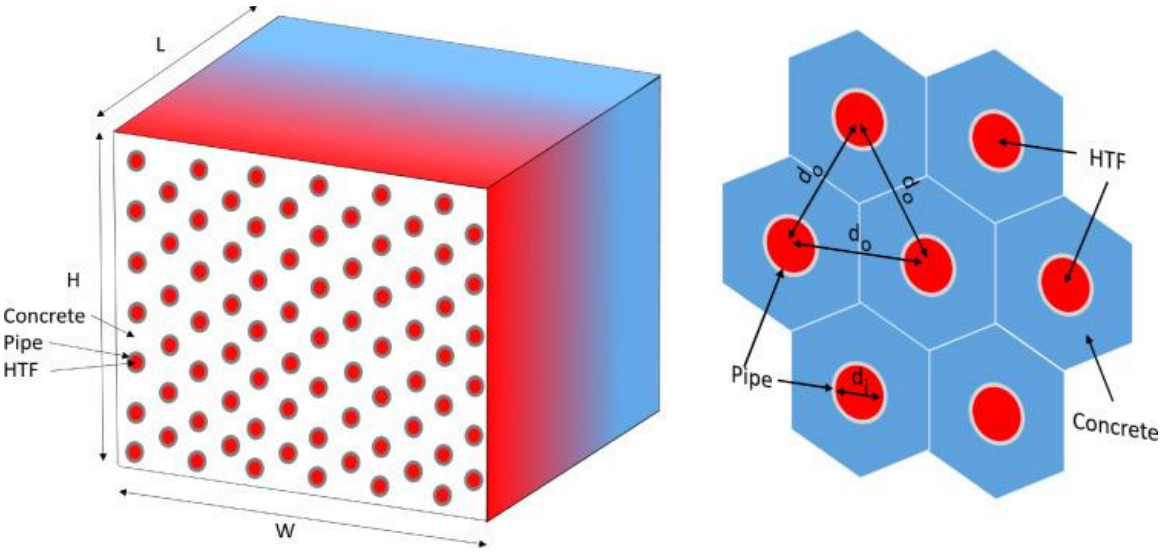


Figura 53. Dibujo esquemático bloque de hormigón.

Se establece la temperatura máxima de trabajo, limitada por el fluido de trabajo, y una disposición de los tubos en forma de triángulo equilátero, obteniendo una mejor distribución de temperaturas que, por ejemplo, la disposición de paso cuadrada. Además, se supone un mismo comportamiento para todas las tuberías del sistema de almacenamiento y una temperatura uniforme en todo el módulo de hormigón.

Debido a los valores bajos de conductividad térmica de los materiales sólidos, implica valores de Bi mayores a 0.1, sería poco preciso el supuesto de una temperatura constante en todo el sólido durante todo el proceso. Por esta razón, se aplica un coeficiente de corrección dependiente de los parámetros de entrada, concretamente del número Re, diámetro interior, diámetro exterior, la relación de aspecto de la longitud de almacenamiento, además de tener en cuenta la resistencia térmica de contacto. Se realizan 323 simulaciones transitorias, con las que aplicando el factor de corrección al modelo CFD, el 93.8% tenían una desviación en un rango de 5ºC y el 6.2% una entre el 5-10ºC.

Para la investigación de las características del almacenamiento térmico transitorio, se realizó un modelo numérico tridimensional usando el software ANSYS-CFX V.18.0. Se modelan los siguientes procesos:

- Convección forzada en las tuberías, considerando tuberías lisas despreciando las incrustaciones.
- Transferencia de calor por conducción en el volumen de la tubería.
- Transferencia de calor por conducción tubería-hormigón.
- Transferencia de calor por conducción en el volumen del hormigón.

Mediante el software ANSYS ICEM CFM, se crea una malla estructurada de un prisma hexagonal, aumentando la densidad de la malla en la región de la malla para obtener una solución más precisa.

Se crearon tres casos diferentes de mallas, M1, M2 y M3, de más gruesa a más fina, comparándose los resultados de la temperatura media del hormigón para los tres casos según los tiempos t1, t2, t3 t4. Se obtiene como resultado que hay una variación considerable entre la M1 y M2, pero la diferencia de temperaturas es despreciable en M2 y M3 por lo que se decide elegir M2 al tener un menor número de elementos.

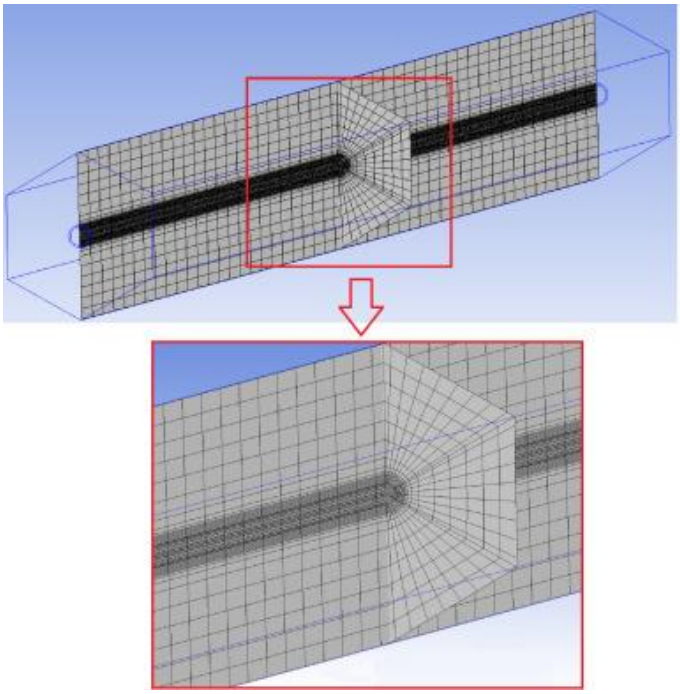


Figura 54. Mallado bloque de hormigón.

Los resultados del modelo CFD se compararon con los datos experimentales, desarrollándose en una configuración de módulo triangular en un módulo de dimensiones 1.7 x 1.3 x 8.37 m. El experimento consta de un ciclo térmico de 264ºC a 364ºC en el que se carga y posteriormente se descarga. El HTF utilizado es Syltherm 800 y entra con un caudal volumétrico constante de $20\frac{m^3}{h}$ y el hormigon N4 de alta temperatura, aunque en simulaciones adicionales se usó Therminol VP1 y Dowtherm Q1 y otros tipos de hormigón.

Las mediciones se comparan con las temperaturas aportadas por dos sensores colocados a 1046 mm de cada extremo del módulo y se observa una excelente concordancia de los datos experimentales y simulados, con errores en la temperatura de salida del rango de 3ºC y de 5ºC de la temperatura media del módulo de hormigón. Además, se realizan otras pruebas para validar el modelo en un módulo TES a escala piloto durante un periodo de 16 días y cuyos resultados se pueden observar en el documento de referencia.

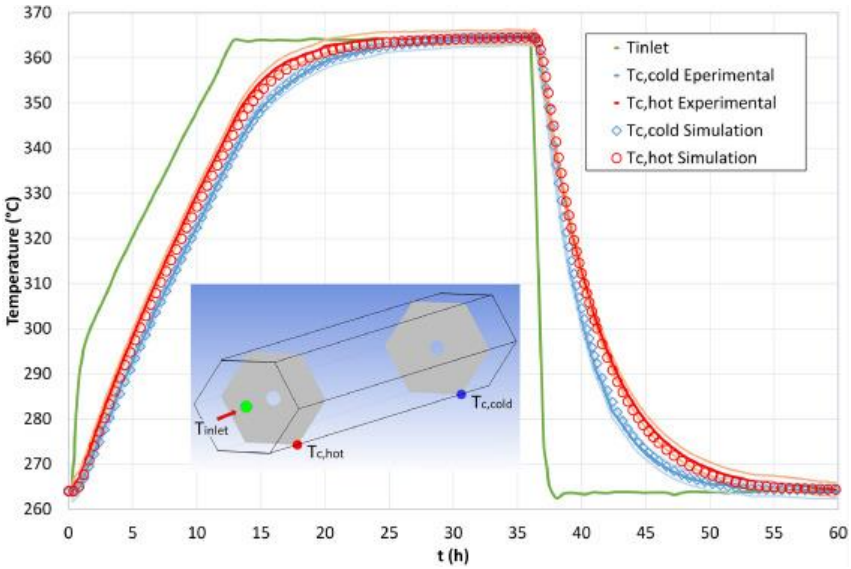


Figura 55. Temperatura aceite experimental y simulada.

Se concluye que es posible utilizar este método de dimensión cero para obtener resultados del sistema TES como la temperatura media del hormigón, la temperatura del HTF, la cantidad de energía almacenada o liberada en el módulo, tiempos de carga y descarga o temperatura de entrada y salida del fluido. Además, se destaca su sencillez frente a los modelos en 1-D que requieren el uso de modelado y mayores esfuerzos computacionales.

3.8.1.2. Aceite 1-D

[Zaversky, F. et al. (2017), ref. 21] En este trabajo se desarrolla un modelo numérico 1-D de almacenamiento de energía térmica en hormigón mediante la herramienta software Modelica y se valida con ensayos experimentales. Adicionalmente se desarrolla una correlación Nusselt para el aceite térmico Therminol VP1 para aumentar la precisión del experimento. Por último, el modelo se escala a una capacidad térmica de tamaño comercial de 504 MWh.

Para el modelado, se usa el método de volumen finito de acuerdo con la biblioteca estándar de Modélica, modelando un único tubo y se acopla a modelos de conducción radial cilíndrica 1-D, representando: el tubo de acero, una fina capa de aire de 0.2mm y conductividad térmica de 0.0261 W/(m*K) y el volumen del hormigón. Para llevar el experimento a un nivel de sistema de 18 final paralelas de módulos de 528 tubos cada una, se hace definiendo la capacitancia, volumen y resistencia térmica equivalente, es decir, multiplicando los volúmenes de control, longitud y área de transferencia por el número de tubos totales.

Debido a que la popular correlación de Gnielinski no se considera apropiada, según simulaciones CFD en ANSYS Fluent, al ser Therminol VP1 un fluido especial de transferencia de calor. La nueva correlación usa la función original de Gnielinski añadiendo dos nuevos parámetros para el cálculo del número de Nusselt para la región transitoria y turbulenta, adaptándose de la siguiente manera a los datos simulados en ANSYS Fluent.

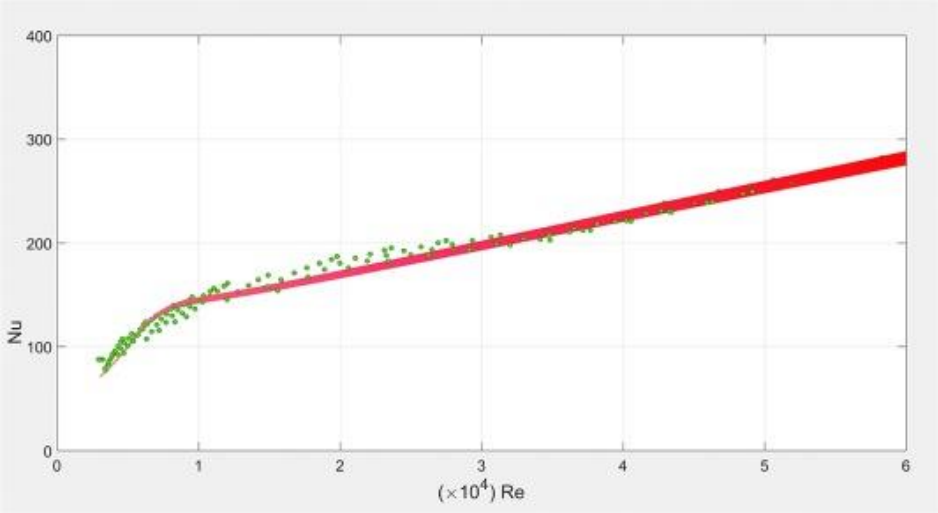


Figura 56. Resultados correlación Gnielinski.

Para la validación con datos experimentales, se usaron las propiedades del Syltherm 800 ya que era en HTF que usaba el modelo piloto usando la correlación según Gnielinski, ya que difieren de las de Therminol VP1. Se alcanza la independencia de red con 15 nodos en dirección radial y 25 en dirección radial. En las siguientes figuras se muestran los datos obtenidos en el experimento de carga de 8 horas, comparándose en la primera de ellas la temperatura de entrada (línea negra) con la de salida experimental (roja) y simulada (negra punteada). La siguiente figura muestra en caudal del experimento y las dos últimas la comparación del número de Reynolds del fluido por los tubos y el coeficiente de transferencia de calor por convección entre el primer y el último volumen de control.

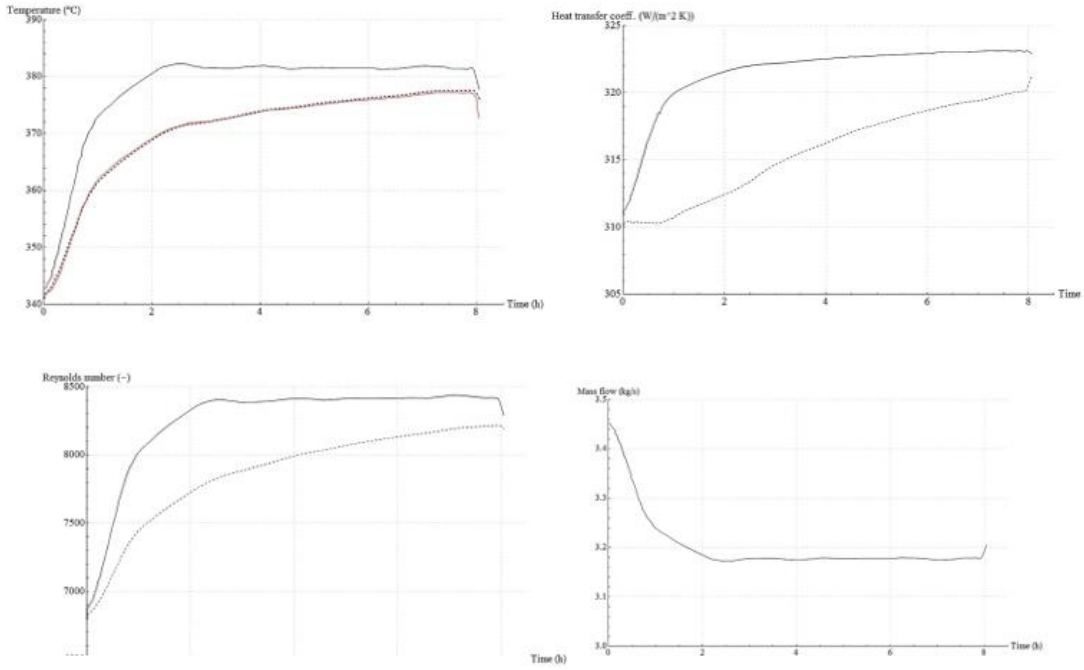


Figura 57. Resultados modelo 1-D aceite.

Posteriormente, se amplía el modelo, en primer lugar, es importante garantizar la independencia de la res. Para un tamaño de 1100 MWh de capacidad térmica se suponen 18 filas de módulos de hormigón, con 14 módulo en serie en cada una de estas. Para ello se determina el número de volúmenes de control para alcanzar la independencia de la red según la temperatura en último de estos volúmenes y se fijan en 160, al ser insignificante la diferencia entre la temperatura con 160 y 320 volúmenes de control.

Se necesita alcanzar un estado transitorio para poder comparar adecuadamente el desempeño del modelo. Se simulará el modelo de forma cíclica de manera que:

- La temperatura de salida de campo del HTF se fija en 391ºC y la de retorno del generador de vapor en 285ºC.
- El proceso de carga termina cuando la zona fría del almacenamiento alcanza 315ºC y el proceso de descarga concluye cuando la zona caliente desciende a 350ºC.
- Flujo másico de 600 kg/s.

Evaluando la siguiente figura, cuyos datos han sido tomados del volumen de control de fluido central, se observa que el estado estacionario cíclico comienza aproximadamente a los 4 ciclos completos, entre 1.5 y 2 días desde el comienzo de la simulación.

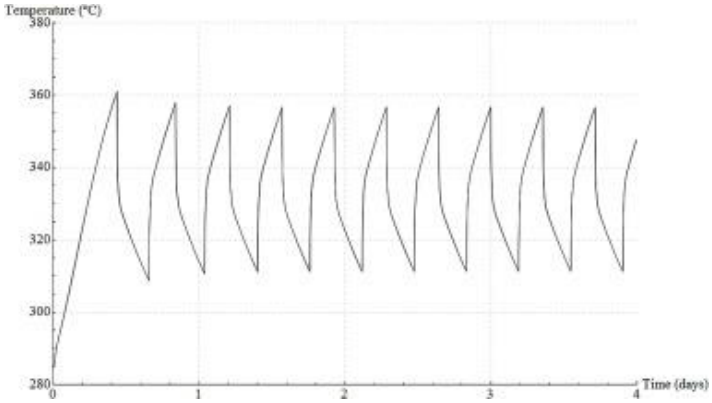


Figura 58. Alcance del estado estacionario del experimento.

Por último, se presenta un almacenamiento de calor indirecto en dos tanques de sal fundida para comparar la respuesta transitoria de ambos medios de almacenamiento. Para obtener los detalles de los tanques de sales fundidas pueden comprobarse en las referencias.

3.8.2. Método de elementos finitos

3.8.2.1. Aire 3-D y 1-D

[Vigneshwaran, K. et al. (2019), ref. 24] Se desarrolló un modelo 3-D para un TES de hormigón, analizando los procesos de transferencia de calor con el software Comsol Multiphysics, plataforma 4.3a. El mallado se hace con elementos tetraédricos y triangulares y estarán más concentrados cerca de las aletas. Además, se hacen las siguientes suposiciones:

1. Se considera adiabático el exterior de todo el módulo de hormigón.
2. El hormigón es homogéneo e isotrópico.
3. Se desprecia la transferencia de calor por radiación.
4. El aire que pasa por el canal principal se divide en varios pasajes diseñados en el módulo de hormigón.

Se encarga una instalación al Indian Institute of Technology Guwahati, Indiay el aire se hace circular con ventilador a 2m3/min y cuenta con un calentador para el HTF, un controlador de temperatura de este, un tubo Pilot para medir la velocidad, válvulas de mariposa, termopares calibrados para controlar la temperatura del hormigón y un material aislante recubriendo toda la instalación. El módulo de hormigón tiene 22 tubos/pasos de cobre de espesor 1.5 mm con 5 aletas soldadas de 10 x 2 mm cada una, estimándose la temperatura de este en 170.41 kg. Para todas las mediciones de temperatura se divide el módulo en 9 fases, 3 divisiones de forma axial y 3 de forma radial con profundidad 25, 50 y 75 mm, midiéndose la temperatura en el centro de cada elemento. Las propiedades del hormigón se especifican a continuación:

$$Cp = 0.85\frac{kJ}{kg * ºC} \quad ; \quad \rho = 2200\frac{kg}{m^3} \quad ; \quad k = 1.5\frac{W}{m * ºC}$$

Se hicieron 10 diferentes pruebas variando las condiciones de carga y descarga como la temperatura de entrada del aceite, la temperatura inicial del hormigón, la temperatura media final del hormigón, la velocidad de entrada. Además, se determina el rango de error de la temperatura de los termopares, la masa del hormigón estimada y la velocidad de paso del aire mediante el método Kline-McClintock que serán ± 0.5, ± 0.5 y ± 0.1 respectivamente.

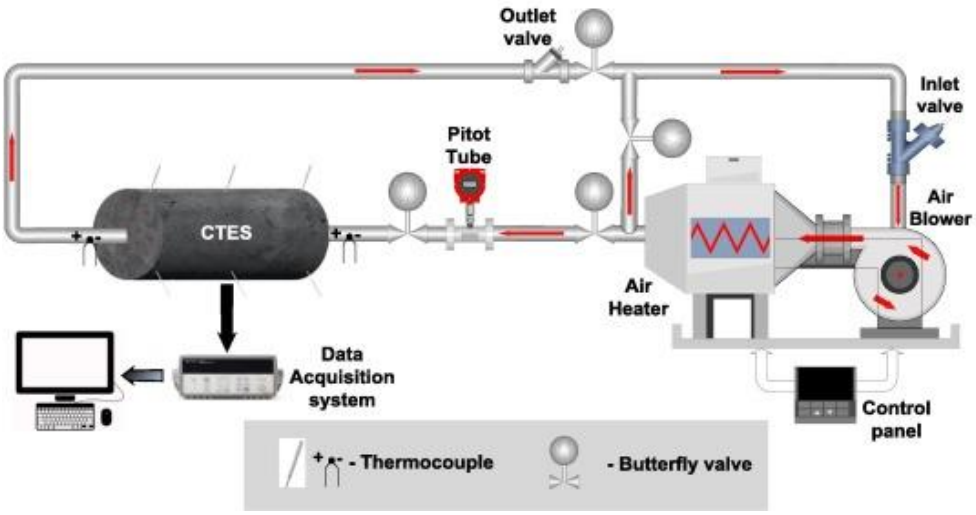


Figura 59. Esquema ensayo CTES.

Debido al gran desafío que conlleva monitorear el desempeño de una instalación en tiempo real usando los modelos numéricos, debido a la gran potencia computacional requerida, se decide simplificar el modelo a 1-D mediante el lenguaje Modelica en Dymola. Para evaluar la variación de temperatura a lo largo del módulo, se usa la teoría del tanque de agitación continua. Con los resultados experimentales se evidencia que la transferencia de calor es rápida y uniforme en la dirección radial comparada con la axial, por lo que se consideran las 3 divisiones axiales del módulo y se calcula la temperatura de salida de aire de cada uno y la temperatura media del hormigón en ellos usando las ecuaciones de conservación de masa y energía.

En el método se considera:

- la velocidad del aire constante
- la temperatura inicial para carga y descarga 170ºC y 240ºC respectivamente
- Temperatura inicial constante
- Propiedades del hormigón constantes
- Propiedades del aire en función de la temperatura

Además, teniendo en consideración la biblioteca de diseño de Dymola y usando la función de error, se calcula el error entre el modelo 1-D y los resultados experimentales obtenidos.

En las siguientes figuras se puede observar cómo los datos obtenidos en los modelos de 1-D y 3-D son parecidos a los valores obtenidos experimentalmente, siendo el valor de estos 6ºC para el modelo en 3-D y 4.9ºC para el modelo 1-D. El menor error en el modelo 1-D se atribuye a la temperatura dinámica del aire en tiempo real, mientras que la herramienta usada en el modelo 3-D tiene limitación para esta.

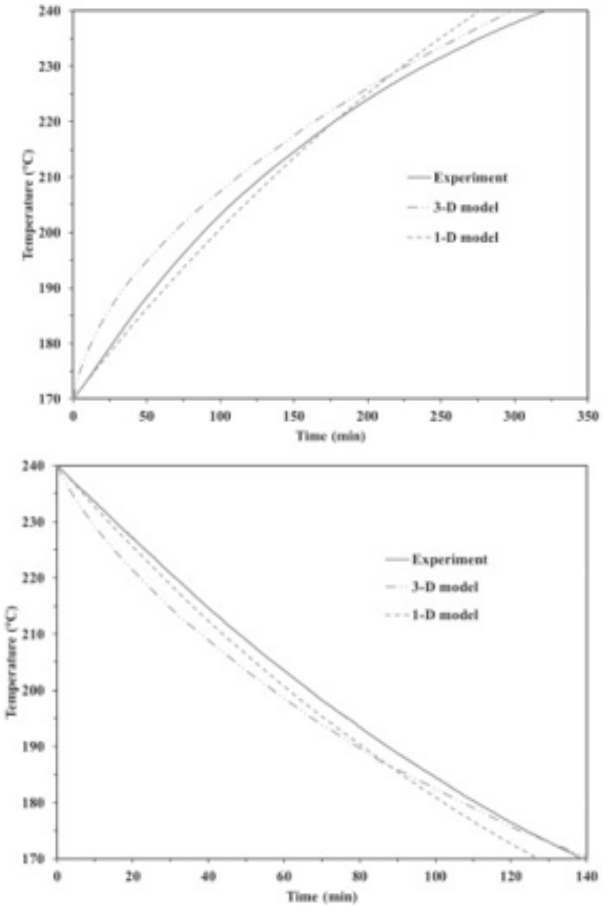


Figura 60. Comparación modelo 3-D y 1-D.

3.8.2.1.1. Variación de la carga en función del tiempo y la temperatura de entrada

Según las numerosas pruebas que se realizaron variando las temperaturas de aire inicial de carga o descarga, se hicieron diferentes afirmaciones. Al cargar el módulo con una temperatura inicial del módulo de 280ºC, 300ºC y 320ºC a una velocidad de 9.97 m/s (2 m/s en el canal principal), de 170 a 240ºC se obtienen los porcentajes de la figura 55 de carga según el tiempo que transcurre una vez iniciado el proceso.

Para el proceso de descarga, con las mismas condiciones de velocidad y siendo la temperatura de entrada 130ºC, 110ºC y 90ºC se observa los porcentajes de carga indicados en la figura 56. Además, se observa que la descarga es relativamente más rápida que la carga, hecho atribuido a una mayor densidad de aire a temperaturas más bajas, lo que aumenta el caudal de aire que circula por los tubos.

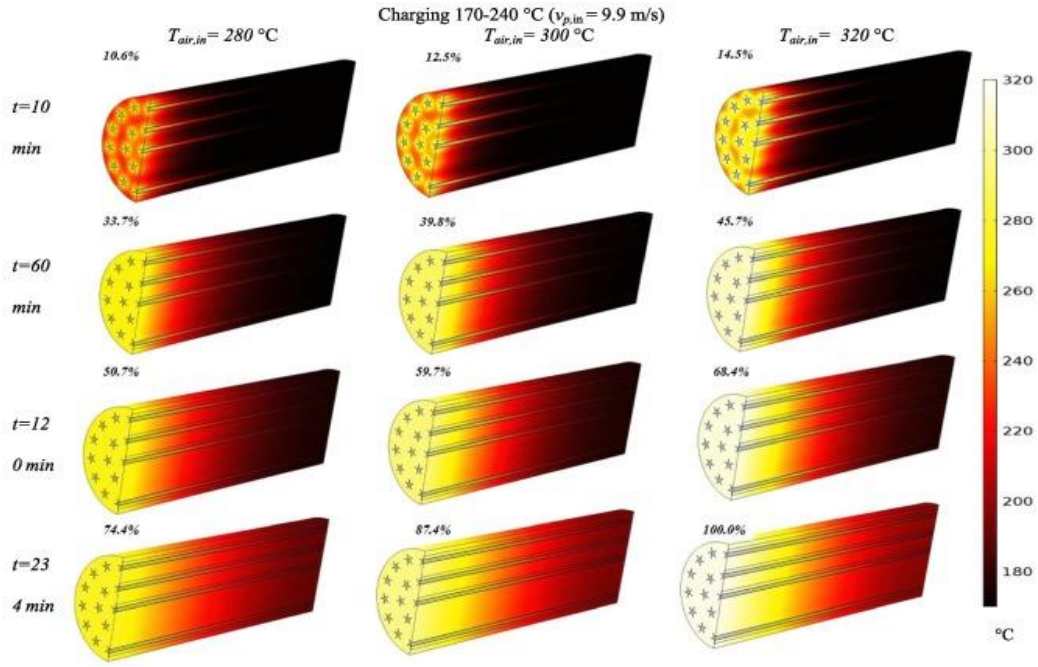


Figura 61. Porcentajes de carga/ temperatura de entrada.

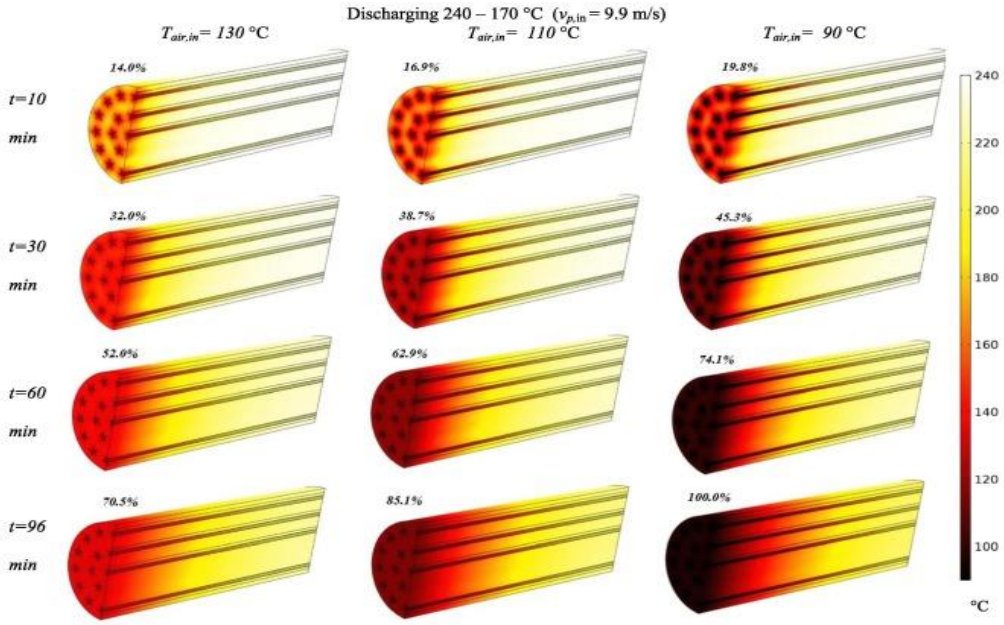


Figura 62. Porcentajes de descarga/ temperatura de entrada.

3.8.2.1.2. Tiempo de carga y descarga en función de la velocidad de entrada del aire

Posteriormente, para comprobar la influencia de la velocidad de entrada del aire, se mantiene la temperatura de entrada de aire a 300ºC y 130ºC para carga y para descarga, y se considera el rango de temperatura de funcionamiento del módulo de hormigón entre 170ºC y 240ºC. Se hacen las diferentes pruebas para una velocidad en el canal de 2,2.5 y 3 m/s quedando los tiempos de carga t descarga reflejados en la siguiente gráfica:

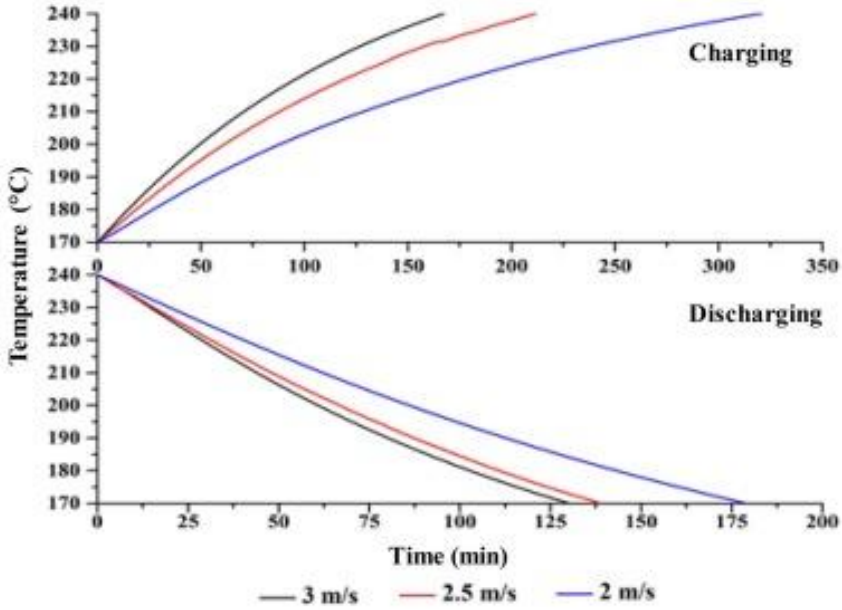


Figura 63. Influencia de la velocidad en la temperatura del módulo.

3.8.2.1.3. Variación de la temperatura en función del tiempo y zona del módulo

Adicionalmente, se analiza la variación de la temperatura con el tiempo en cada zona del módulo de hormigón, es decir, a lo largo de este y según la distancia radial al centro de este mediante la simulación 3-D. Los resultados aparecen en la siguiente tabla, observándose una mayor transferencia de calor de forma radial, siendo esta de un máximo de 5ºC entre punto y punto, debido al descenso de temperatura del HTF a lo largo de la longitud y que la temperatura disminuye al aumentar la longitud y la distancia a la superficie para carga y aumenta en el proceso de descarga.

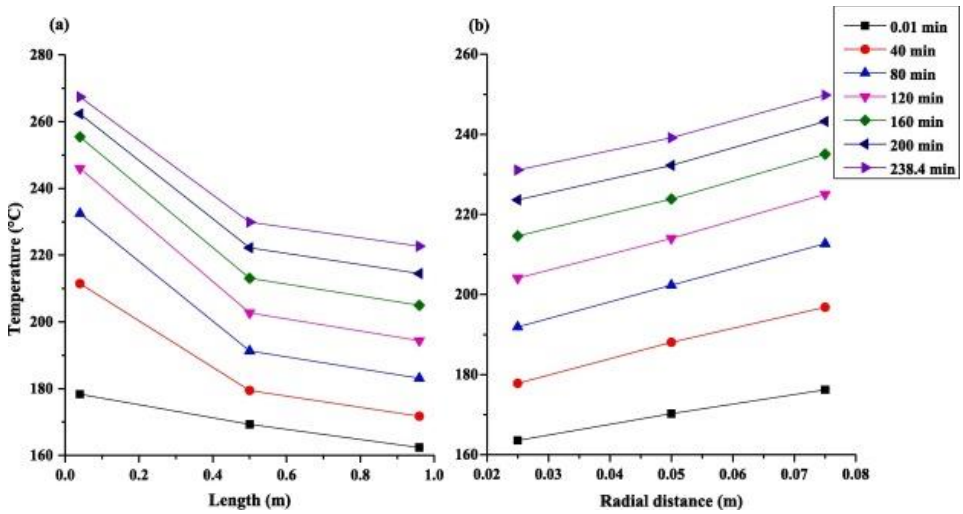


Figura 64.Temperatura según longitud y distancia radial a lo largo del tiempo en carga.

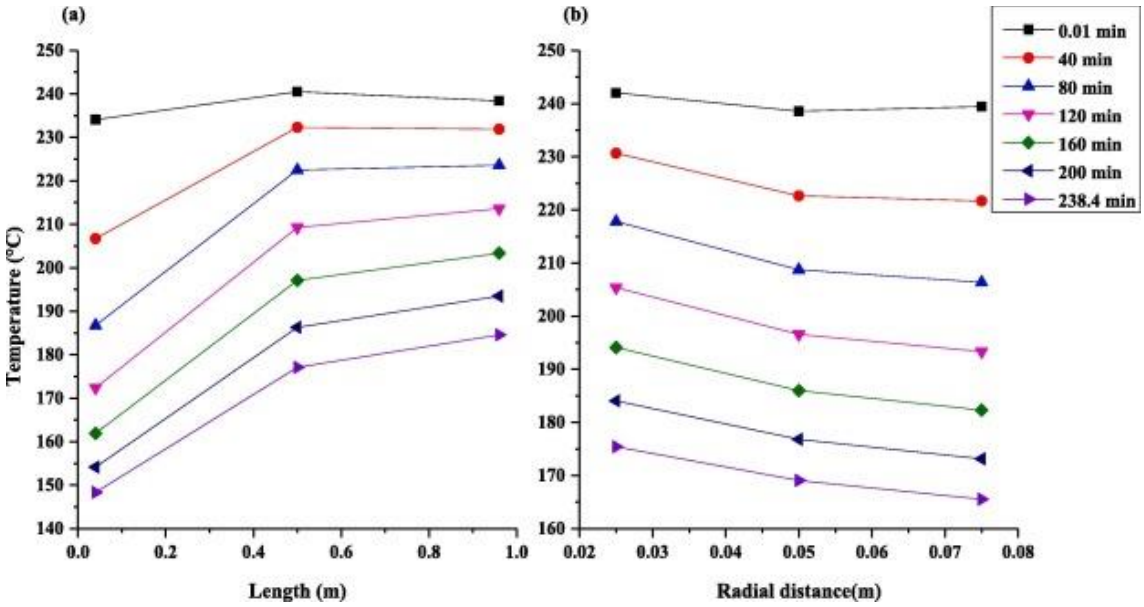


Figura 65. Temperatura según longitud y distancia radial a lo largo del tiempo en descarga.

3.8.2.1.4. Tasa de carga y descarga de energía de energía térmica

Se analiza la tasa de acumulación o descarga de energía térmica para los procesos de carga y descarga de energía térmica en función de la temperatura de aire de entrada. En el proceso de carga, al aumentar la temperatura de 280ºC a 300ºC, el tiempo de carga se reduce un 28.9% y al aumentarse a 320ºC, un 25.9%. Para el proceso de descarga el tiempo disminuye un 22.3% si disminuimos la temperatura de 130ºC a 110ºC y un 10.9% al disminuir la temperatura de entrada de 110ºC a 90ºC.

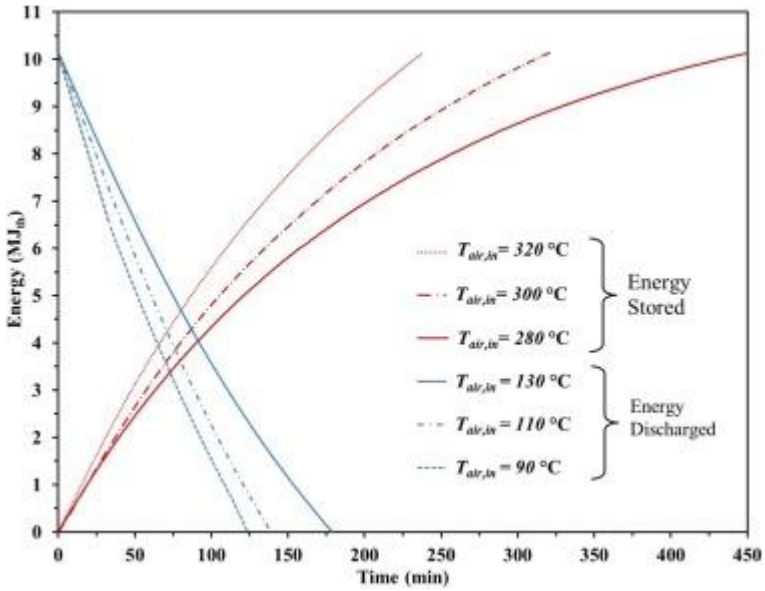


Figura 66. Energía cargada y descargada según temperatura de entrada.

Por otro lado, se deduce que, con el paso del tiempo, al aumentar la energía descargada del módulo, la potencia disminuye si se mantiene una velocidad fija del aire de entrada. Por lo que se considera viable variar la velocidad de aire de entrada si se desea conseguir una potencia constante. También se considera que la potencia máxima en los instantes iniciales del proceso de descarga es muy beneficiosa para equilibrar la demanda repentina de energía durante las horas pico. Se muestran a continuación la representación gráfica de lo comentado:

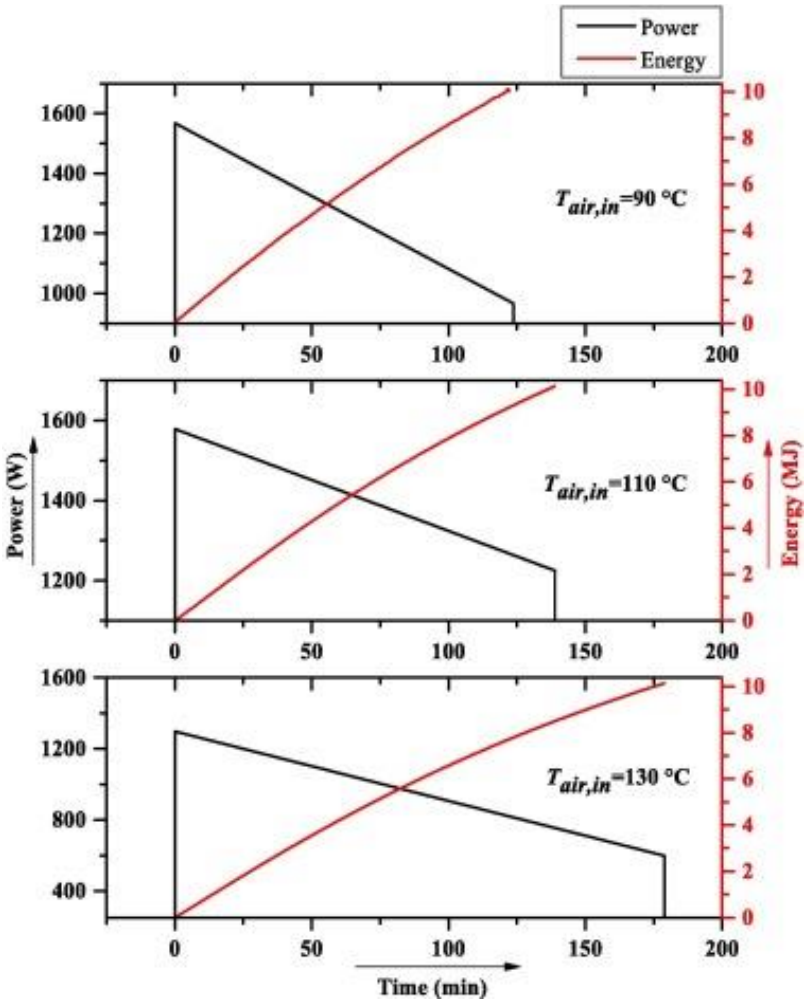


Figura 67. Disminución de la potencia a lo largo del tiempo.

En el estudio se realizan experimentos con diferentes condiciones de operación para analizar el desempeño del sistema, sin embargo, si se adoptase en aplicaciones industriales, sería necesario estudiar el sistema según procesos ascendentes y descendentes de velocidad y temperatura de entrada y hallar una condición óptima. En la siguiente tabla se resumen las características de carga y descarga en el módulo de hormigón.

$v_{entrada}$ $\frac{m}{s}$	$T_{entrada}$ ºC	$T_{inicial}$ ºC	T_{final} ºC	t min	Q_c (MJ)	Q_d (MJ)	Q_{cte}		
							$kW*h$	$\frac{kW*h}{m^3}$	$\frac{kW*h}{kg}$
2.5	415	100	330	501	32,8	-	9.11	117,6	0.0534
2	280	170	240	451	10.13	-	2,81	36,28	0.0164
2	300	170	240	321	11.13	-	2,82	36,29	1.0164
2.5	300	170	240	212	12.13	-	2,83	36,30	2.0164
3	300	170	240	167	13.13	-	2,84	36,31	3.0164
2	320	170	240	238	14.13	-	2,85	36,32	4.0164
2	130	70	170	179	-	10.13	2,81	36,28	0.0164
2.5	130	70	170	139	-	11.13	2,82	36,29	1.0164
3	130	70	170	130	-	12.13	2,83	36,30	2.0164
2	110	70	170	139	-	13.13	2,84	36,31	3.0164
2	90	70	170	127	-	14.13	2,85	36,32	4.0164

Tabla 23. Resumen resulados usando aire como HTF.

3.8.2.1.5. Consecuencias de los experimentos en el hormigón

Tras los experimentos, el módulo de hormigón ya había sido sometido a más de 300 ciclos de carga durante 36 meses en un rango de temperaturas de 60-480ºC. Las elevadas temperaturas hicieron que se apreciase una pequeña grieta en la primera zona del módulo, siendo eta la que había sido sometida a temperaturas más elevadas. Concluyendo que el módulo de hormigón tiene una alta capacidad de duración al no encontrarse más grietas a lo largo del módulo. En la siguiente imagen se observa la grieta comentada en este apartado:

Figura 68. Grietas tras 36 meses de pruebas experimentales.

3.8.2.2. Aceite 3-D

[Bataineh, K. et al. (2018), ref. 22] Se presentó una investigación numérica de 3 TES, hormigón, sal del Mar Muerto y Roca de basalto, comparados entre sí usando un modelo matemático en 3-D basado en el método de elementos finitos y utilizando el software COMSOL Multiphysics 5.1. Se almacena calor en el rango de temperatura 523-673K usando aceite como HTF, y la capacidad de cada tanque fue de 137 GJ, siendo diferente los volúmenes de cada tanque. Para probar el modelo se compara con trabajos publicados anteriormente teniendo muy buena concordancia. Los tres materiales presentaban las siguientes características:

Material	Densidad $\frac{kg}{m^3}$	Calor específico $\frac{J}{kg * K}$	Conductividad térmica $\frac{W}{m * K}$
Roca de basalto	2700	875	2
Sal del mar muerto	2160	1050	7
Hormigón	2200	1000	2
HTF	765	2800	0.121

Tabla 24. Características materiales de prueba.

Se utiliza una temperatura de entrada de 663K, caudal másico de 135 kg/s, velocidad de o,25 m/s y módulos con 45 tubos de 0.02 m de diámetro. Se observa que la temperatura media volumétrica de la roca de basalto y el lecho de hormigón son similares, esto se debe a tener capacidad calorífica y conductividad térmica similares y siendo la conductividad térmica de las sales del Mar Muerto mayor. Se muestra un rendimiento de la sal del Mar Muerto ligeramente superior que el de los otros dos materiales. El tiempo de carga para los tres materiales fue de aproximadamente 180 minutos.

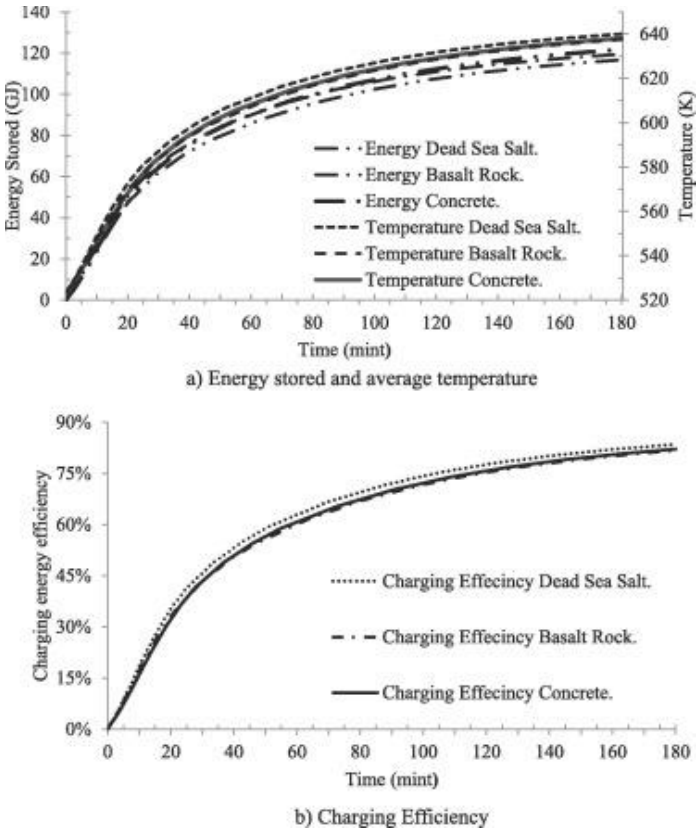


Tabla 25. Energía almacenada y porcentage de carga 3 materiales sólidos.

4. Conclusión

El hormigón utilizado como TES es una tecnología novedosa, y aun por desarrollarse tantopor si sola como junto otras tecnologías como PCM teniendo capacidad para almacenar energía a una temperatura de hasta 600ºC. Actualmente existen únicamente 36 publicaciones acerca de esta, siendo 34 artículos de investigación. En una revisión de todas las plantas termosolares construidas hasta la actualidad se descubre que 3 plantas de las 156 existentes usan hormigón como TES, están situadas en China y las 3 usan la tecnología Fresnel.

La conductividad térmica de este material está entre 1.4-3.6 $\frac{W}{m*K}$ a temperatura ambiente y disminuye al aumentar la temperatura, siendo mayor la del homigón de alta resistencia, por otro lado, el hormigon tendrá una perdida de masa más importante a partir de 600ºC. El coeficiente de expansión térmica aumentará con la temperatura llegando a alcanzar valores del 1.3%, esta propiedad será importante para hacerla coincidir en la medida de lo posible con el coeficiente de expansión térmica de los tubos interiores al bloque de hormigón, ya que siendo diferentes podría dar lugar a grietas en este.

Los principales problemas de este material son la aparición de microgrietas y el desconchado explosivo entre 450-550ºC, el cual se produce por un aumento de la presión en los poros al no encontrar el vapor ninguna ruta de escape para salir del material. Investigaciones desarrolladas en anteriores secciones han dado solución a estos problemas, considerándose necesaria la adición de fibras de polipropileno con una cantidad entre 2-3$\frac{kg}{m^3}$ y teniendo un calentamiento lento, reposando el material a 400ºC para que se estabilice antes de seguir calentando este.

Por otro lado, el hormigón puede ser de diferentes tipos y contener proporciones dispares en sus agregados. A pesar de que el cemento de aluminato de calcio es más resistente y aporta mayor conductividad térmica que el cemento Portland, en la documentación revisada no se considera justificado el aumento de precio, sin embargo, si se justifica el aumento mediante la adición de 100 $\frac{lb}{yd^3}$ de fibras de acero las cuales aumenta la conductividad térmica en un 18%. Es importante resaltar las propiedades que aportan los agregados gruesos y finos, aportando los primeros mayor conductividad térmica y los segundos mayor resistencia residual, primando la importancia de la segunda propiedad frente a la primera. En términos generales, considerando precio y propiedades se recomienda el uso de una mezcla con aproximadamente 1500 $\frac{lb}{yd^3}$(890 $\frac{kg}{m^3}$) de cemento Portland, un 15% de humo de sílice para aumentar la resistencia del hormigón y un 30% de reemplazo de cenizas volantes Tipo C, que aportan resistencia y durabilidad, aunque como el humo de sílice, penalizará la conductividad, y alrededor de 30-50 $\frac{lb}{yd^3}$ de fibras de acero que mejorarán la conductividad. La relación de agua/materiales cementíceos ($\frac{w}{cm}$) debe ser entre 0.2 y 0.25, y cantidad de reductor de agua de alto rango adecuado para mejorar la trabajabilidad. La proporción de cemento-agregados debe estar en el rango 1:1 a 1:4 y tamaño máximo de estos no debe superar los 6.35 mm, considerando granito una opción adecuada. Por último, es importante que la mezcla contenga unos 2 $\frac{kg}{m^3}$ de fibras de polipropileno multifilamento para evitar el desconchado del hormigón.

Por otro lado, el intercambiador metálico de acero deberá ser revestido por una fina capa de material resistente al calor, con bajo módulo de elasticidad (<0.5 ksi) y alta conductividad térmica. También se recomiendaañadir 4 o 6 aletas a los tubos ya que

disminuirán considerablemente el tiempo de carga y aportarán resistencia al módulo de hormigón

En 2016 fue creada HEATCRETE, una mezcla patentada y probada en Masdar Institute Plataform con aceite térmico como HTF, la cual presume de tener un 70% más de conductividad térmica y un 15% más de capacidadcalorífica, además de reducir los costes de toda la planta CSP en un 10%, siendo el sistema un 60% más barato que el de sales fundidas. Los resultados a altas temperaturas sido increíbles hasta 450ºC donde deja de ser estable. El hormigón, en general, es un material simple, fácilmente escalable, barato tanto en inversión como en operación y deja una huella mínima en el medio ambiente comparado que otras tecnologías.

Actualmente existen en el mundo úncamente tres plantas CSP que usen esta tecnología, las tres usan receptores lineales fresnel y agua/vapor como HTF, además de situarse en China, estando una de ellas en desarrollo y otra no operativa. Por tanto, el hormigón utilizado como TES es una tecnología con mucho potencial la cual podría ser la mejor opción del mercado en pocos años frente a las sales fundidas, las cuales son usadas como medio de almacenamiento en el 80% de las plantas termosolares con medio de almacenamiento, pero necesita madurez y llegar a aportar la seguridad que aportan lassales fundidas debido a sus años en el mercado.

Las tres plantas existentes que poseen almacenamiento térmico de hormigón usan vapor como HTF en plantas termosolares Fresnel, sin embargo, el hormigón es perfectamente compatible con aceite térmico como bien se ha probado en Masdar Institute Plataform desde 2016. A continuación, se aporta una tabla con las propiedades de estos según su temperatura:

HTF	Syltherm 800	Dowtherm Q1	Therminol VP1
Densidad $\frac{kg}{m^3}$	$6.023 * 10^{-4} * T^2$ $-7.945 * 10^{-2} * T$ $+9.587 * 10^2$	$-7.56 * 10^{-1} * T$ $+9.805 * 10^2$	$-1.019 * T$ $+1.114 * 10^3$
Capacidad calorífica $\frac{J}{kg*K}$	$1.700 * 10 * T$ $+1.574 * 10^3$	$2.987 * 10 * T$ $+1.605 * 10^3$	$2.819 * T$ $+1.483 * 10^3$
Conductividad térmica $\frac{W}{mK}$	$-1.905 * 10^{-4} * T$ $+1.4 * 10^{-1}$	$-1.502 * 10^{-4} * T$ $+1.263 * 10^{-1}$	$-1.771 * 10^{-4} * T$ $+1.483 * 10^{-1}$
Viscosidad dinámica (Pa*s)	$1.416 * 10^{-12} * T^4$ $-1.659 * 10^{-9} * T^3$ $+7.178 * 10^{-7} * T^2$ $-5.478 * 10^{-2} * T$ $+1.142 * 10^{-2}$	$1.326 * 10^{-12} * T^4$ $-1.295 * 10^{-9} * T^3$ $+4.613 * 10^{-7} * T^2$ $-7.239 * 10^{-5} * T$ $+4.585 * 10^{-3}$	$2.042 * 10^{-13} * T^4$ $-2.601 * 10^{-10} * T^3$ $+1.260 * 10^{-7} * T^2$ $-2.848 * 10^{-5} * T$ $+2.801 * 10^{\wedge}(-3)$

Tabla 26. Propiedades de los aceites térmicos.

Referencias

1. Laing, D., Bahl, C., Bauer, T., Lehmann, D., & Steinmann, W. D. (2011). Thermal energy storage for direct steam generation. *Solar Energy*, *85*(4), 627–633. https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.08.015
2. Tian, Y., & Zhao, C. Y. (2013). A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. Applied Energy, 104, 538–553. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.051
3. Pelay, U., Luo, L., Fan, Y., Stitou, D., & Rood, M. (2017). Thermal energy storage systems for concentrated solar power plants. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 79(March 2016), 82–100. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.139
4. Islam, M. T., Huda, N., Abdullah, A. B., & Saidur, R. (2018). A comprehensive review of state-of-the-art concentrating solar power (CSP) technologies: Current status and research trends. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 91(November 2017), 987–1018. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.097
5. Calderón, A., Barreneche, C., Hernández-Valle, K., Galindo, E., Segarra, M., & Fernández, A. I. (2020). Where is Thermal Energy Storage (TES) research going? – A bibliometric analysis. Solar Energy, 200(December 2018), 37–50. https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.01.050
6. Kuravi, S., Goswami, D. Y., Stefanakos, E. K., Ram, M., Jotshi, C., Trahan, J., … Krakow, B. (2012). THERMAL ENERGY STORAGE FOR CONCENTRATING SOLAR POWER PLANTS Sarada Kuravi, D. Yogi Goswami, Elias K. Stefanakos, Manoj Ram, Chand Jotshi, Swetha Pendyala, Jamie Trahan, Prashanth Sridharan, Muhammad Rahman and Burton Krakow Clean Energy Research Center, U. Technology & Innovation, 14(Feburary), 81–91. https://doi.org/https://doi.org/10.3727/194982412X13462021397570
7. Two, S. (n.d.). Tipologías de sistemas de almacenamiento térmico, 1–7.
8. John, E. E. (2012). The Development of a High Performance Concrete to Store Thermal Energy for Concentrating Solar Power Plants.
9. Khare, S., Dell'Amico, M., Knight, C., & McGarry, S. (2013). Selection of materials for high temperature sensible energy storage. Solar Energy Materials and Solar Cells, 115, 114–122. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.03.009
10. Jian, Y., Falcoz, Q., Neveu, P., Bai, F., Wang, Y., & Wang, Z. (2015). Design and optimization of solid thermal energy storage modules for solar thermal power plant applications. Applied Energy, 139, 30–42. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.11.019
11. Oró, E., Gil, A., de Gracia, A., Boer, D., & Cabeza, L. F. (2012). Comparative life cycle assessment of thermal energy storage systems for solar power plants. Renewable Energy, 44, 166–173. https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.008
12. John, E., Hale, M., & Selvam, P. (2013). Concrete as a thermal energy storage medium for thermocline solar energy storage systems. Solar Energy, 96, 194–204. https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.06.033
13. Prasad, L., & Muthukumar, P. (2013). Design and optimization of lab-scale sensible heat storage prototype for solar thermal power plant application. Solar Energy, 97, 217–229. https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.08.022
14. R. Kacianauskas, I. G. Rafoyiannis, and J. Wang (2014). Properties of Concrete at Elevated Temperatures. https://www.hindawi.com/journals/isrn/2014/468510/
15. Xiang, K., Wang, G. H., & Pan, Y. C. (2015). Thermal properties and heat transfer in concrete filled steel tube reinforced concrete columns exposed to fire.

Proceedings - 7th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, ICICTA 2014, 869–874. https://doi.org/10.1109/ICICTA.2014.208
16. Laing, D., Lehmann, D., & Bahl, C. (2008). Concrete Storage for Solar Thermal Power Plants and Industrial Process Heat. Conference Proceedings, 1–6.
17. Bahl, C., Laing, D., Hempel, M., & Stückle, A. (2009). Concrete thermal energy storage for solar thermal power plants and industrial process heat. Proceedings of SolarPACES Conference.
18. Doerte, L., Tamme, S. W., Wörner, R., & Zunft, A. (2012). 201212109457304, (l).
19. Laing, D., Bahl, C., Bauer, T., Fiss, M., Breidenbach, N., & Hempel, M. (2012). High-temperature solid-media thermal energy storage for solar thermal power plants. Proceedings of the IEEE, 100(2), 516–524. https://doi.org/10.1109/JPROC.2011.2154290
20. Salomoni, V. A., Majorana, C. E., Giannuzzi, G. M., Miliozzi, A., Di Maggio, R., Girardi, F., … Lucentini, M. (2014). Thermal storage of sensible heat using concrete modules in solar power plants. Solar Energy, 103, 303–315. https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.02.022
21. Zaversky, F., Pérez de Zabalza Asiain, J., & Sánchez, M. (2017). Transient response simulation of a passive sensible heat storage system and the comparison to a conventional active indirect two-tank unit. Energy, 139, 782–797. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.156
22. Bataineh, K., & Gharaibeh, A. (2018). Optimal design for sensible thermal energy storage tank using natural solid materials for a parabolic trough power plant. Solar Energy, 171(May), 519–525. https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.06.108
23. Doretti, L., Martelletto, F., & Mancin, S. (2019). A simplified analytical approach for concrete sensible thermal energy storages simulation. Journal of Energy Storage, 22(February), 68–79. https://doi.org/10.1016/j.est.2019.01.029
24. Vigneshwaran, K., Singh Sodhi, G., Muthukumar, P., & Subbiah, S. (2019). Concrete based high temperature thermal energy storage system: Experimental and numerical studies. Energy Conversion and Management, 198(August), 111905. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111905
25. Suárez, C., Pino, F. J., & Guerra, J. (2020). A new simplified model for the unsteady response of concrete passive sensible TES systems. Journal of Energy Storage, 27(July 2019), 101042. https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101042
26. Doretti, L., Martelletto, F., & Mancin, S. (2020). Numerical analyses of concrete thermal energy storage systems: effect of the modules' arrangement. Energy Reports, (xxxx). https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.07.002
27. Laing, D., Bahl, C., Bauer, T., Fiss, M., Breidenbach, N., & Hempel, M. (2012). High-temperature solid-media thermal energy storage for solar thermal power plants. Proceedings of the IEEE, 100(2), 516–524. https://doi.org/10.1109/JPROC.2011.2154290
28. Hoivik, N., Greiner, C., Barragan, J., Iniesta, A. C., Skeie, G., Bergan, P., Blanco-Rodriguez, P., & Calvet, N. (2019). Long-term performance results of concrete-based modular thermal energy storage system. *Journal of Energy Storage*, *24*(March), 100735. https://doi.org/10.1016/j.est.2019.04.009

Glosario

ASCE: American Society of Civil Engineers-

CSP: Concentrating Solar Power.

DLR: Cento Aeroespacial Alemán.

DSG: Direct Steam Generation.

EE. UU.: Estados Unidos.

HSC: Hormigón de alta resistencia.

HTF: Heat Thermal Fluid.

IMP: Categoría de impacto ambiental.

LCA: Evaluación del ciclo de vida.

NSC: Hormigón de resistencia normal.

PCM: Phase Change Material.

PP: Polipropileno.

TES: Thermal Energy Storage.

TRL: Tasa de publicación.

UHP: Hormigós de ultra alta resistencia.