

Trabajo Fin de Máster  
Máster en Ingeniería Industrial

Criterios de diseño de un sistema de almacenamiento  
de energía térmica en hormigón para aplicaciones  
industriales

Autor: Miriam Cordero Guinea  
Tutor: José Julio Guerra Macho  
Co-tutor: Christian Suárez Soria

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

Sevilla, 2021





Trabajo Fin de Máster  
Máster en Ingeniería Industrial

# **Criterios de diseño de un sistema de almacenamiento de energía térmica en hormigón para aplicaciones industriales**

Autor:

Miriam Cordero Guinea

Tutor:

D.José Julio Guerra Macho

Catedrático de Universidad

Co-tutor:

D.Christian Suárez Soria

Profesor sustituto interino

Departamento de Ingeniería Energética

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021



# Agradecimientos

---

En primer lugar, me gustaría dar las gracias a Don José Julio Guerra Macho y a Don Christian Suárez Soria, por confiarme este proyecto.

Gracias a mis padres y a mi hermana Teresa, por su apoyo, sus consejos y cariño incondicional cada día.

También me gustaría agradecer a mi abuelo Telesforo, a mis tíos Sonia y Juan Antonio, a mis primos Alejandra y Juan, y a mis amigos por siempre estar ahí y ser una fuente de apoyo constante.

*Miriam Cordero Guinea*

*Sevilla, 2021.*

# Resumen

---

El campo de energía solar de concentración y los sistemas de almacenamiento de energía térmica (TES) tienen la virtud de dar un uso mejor a la energía térmica utilizando la misma para reducir o eliminar la generación de energía fluctuante y generar electricidad, para generar vapor que se utiliza en un proceso industrial o bien para otra aplicación térmica que requiera calor, también se puede utilizar para la producción de frío utilizando una máquina de absorción. En el primer apartado, se va a situar el sistema de almacenamiento térmico en hormigón dentro de una clasificación global en la cual se explican los diferentes sistemas de almacenamiento existentes, a continuación, en el apartado segundo se explican las propiedades y características que debe poseer el hormigón que se emplea como medio de almacenamiento (buena conductividad térmica, excelentes propiedades mecánicas) y se comparan diferentes mezclas de hormigón que se utilizan como sistema de almacenamiento térmico. En el apartado tercero se recogen algunas aplicaciones térmicas industriales que utilizan este sistema almacenamiento térmico, en él se describe el TES utilizado y los resultados experimentales obtenidos al realizar ciertas mediciones. En el cuarto apartado se analiza el comportamiento térmico del sistema que se simula implementando un modelo matemático simplificado, se verifican los resultados del programa EES con los resultados experimentales, y en el quinto apartado se realiza un análisis paramétrico del cual se obtienen determinados criterios de diseño.

# Índice de contenido

Agradecimientos .....	5
Resumen .....	6
Índice de contenido.....	7
Índice de Tablas .....	10
Índice de Figuras .....	11
Notación .....	14
<b>1 Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Introducción</i> .....	1
1.2 <i>Principales tecnologías que permiten almacenar y transformar energía</i> .....	1
1.2.1 Almacenamiento mecánico .....	2
1.2.1.1 Bombeo eléctrico (Sistemas PHES).....	2
1.2.1.2 Aire comprimido (Sistemas CAES) .....	3
1.2.1.3 Volantes de inercia .....	3
1.2.2 Almacenamiento químico.....	4
1.2.2.1 Baterías de ión-litio.....	4
1.2.2.2 Baterías de titanato de litio.....	4
1.2.2.3 Baterías de plomo-ácido y baterías de plomo carbono.....	4
1.2.2.4 Baterías de flujo .....	4
1.2.2.5 Pilas de combustible de hidrógeno .....	5
1.2.3 Almacenamiento electromagnético.....	5
1.2.3.1 Supercondensador .....	5
1.2.3.2 Superconductores o sistemas SME .....	5
1.2.4 Almacenamiento térmico .....	6
1.2.4.1 Diseño a nivel de planta. ....	7
1.2.4.2 Diseño a nivel de componente .....	7
1.2.4.3 Diseño a nivel de sistema.....	10
<b>2 Sistema de almacenamiento de energía en hormigón .....</b>	<b>15</b>
2.1 <i>Introducción</i> .....	15
2.2 <i>El hormigón como medio de almacenamiento sólido</i> .....	16
2.2.1 Ventajas e inconvenientes del hormigón como medio de almacenamiento .....	16
2.2.2 Composición y propiedades del hormigón.....	16
2.2.2.1 Composición del hormigón .....	16
2.2.2.2 Propiedades del hormigón.....	16
2.2.3 Cómo influye elegir un hormigón u otro en las propiedades termofísicas del TES .....	17
2.2.3.1 Hormigón reforzado con fibras.....	17
2.2.3.2 Heatcrete® .....	18
2.2.3.3 Estudio comparativo entre diferentes mezclas de hormigón .....	21
2.2.3.4 Estudio comparativo entre hormigones ligeros. ....	22
2.2.3.5 Estudio comparativo entre distintas mezclas de hormigón .....	24
2.3 <i>Intercambiador de calor</i> .....	25
2.3.1 Material del intercambiador de calor .....	25
2.3.2 Geometría del intercambiador de calor.....	25
2.3.3 Disposición de los tubos del intercambiador de calor .....	26
<b>3 Aplicaciones industriales que utilizan sistemas de almacenamiento de energía térmica en hormigón</b>	<b>27</b>
3.1 <i>Introducción</i> .....	27
3.2 <i>Sistema de almacenamiento de EnergyNest</i> .....	27

3.2.1	Principio de funcionamiento del sistema y principales características .....	27
3.2.2	Proyecto que utiliza el sistema de almacenamiento térmico de EnergyNest.....	29
3.2.3	Proyecto realizado por Masdar Institute of Science and Technology y EnergyNest en 2015 .....	31
3.2.3.1	Características de la planta y del sistema de almacenamiento instalado .....	31
3.2.3.2	Resultados experimentales y resultados de las simulaciones.....	33
3.3	<i>Proyecto EDITOR y el sistema SOLIDTES.</i> .....	36
3.3.1	Localización y esquema del proyecto, principales características del mismo.....	36
3.3.2	Principio de funcionamiento del sistema automatizado, modos de funcionamiento. ....	37
3.3.3	Resultados de las simulaciones y de los ensayos realizados .....	38
3.4	<i>Sistema de almacenamiento que utiliza hormigón Cestari SRL e Italcementi.</i> .....	39
3.4.1	Principales características del proyecto .....	39
3.4.2	Resultados experimentales de los ensayos .....	41
<b>4</b>	<b>Modelo matemático .....</b>	<b>43</b>
4.1	<i>Introducción</i> .....	43
4.2	<i>Aplicaciones del modelo matemático y parámetros de entrada</i> .....	43
4.3	<i>Descripción de la transferencia de calor en el módulo de hormigón</i> .....	44
4.4	<i>Descripción del modelo matemático simplificado</i> .....	45
4.4.1	Cálculo del Re, Pr, y f .....	46
4.4.2	Cálculo del Nusselt.....	46
4.4.3	Cálculo del coeficiente de transferencia de calor convectivo h. ....	46
4.4.4	Cálculo de la longitud característica $L_c$ y de los parámetros adimensionales $\eta$ y $Ar$ .....	47
4.4.5	Cálculo de los factores correctores. ....	47
4.4.6	Evolución con el tiempo de la temperatura media en el módulo de hormigón.....	47
4.4.7	Evolución temporal del flujo de calor intercambiado.....	47
4.4.8	Energía absorbida o liberada en un periodo de tiempo .....	47
4.4.9	Tiempo de carga $tstg$ requerido para almacenar una cantidad de energía. ....	47
4.4.10	Obtener la evolución temporal de la temperatura de salida del HTF; THTF, out.....	48
4.5	<i>Implementación del modelo matemático y verificación de los resultados.</i> .....	48
<b>5</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>55</b>
5.1	<i>Introducción</i> .....	55
5.2	<i>Análisis paramétrico</i> .....	55
5.2.1	Caso base.....	55
5.2.2	Análisis paramétrico y discusión.....	59
5.2.2.1	Análisis al variar la velocidad del fluido térmico .....	59
5.2.2.2	Análisis al variar la distancia de centro a centro entre los tubos (número de tubos constante) 62	
5.2.2.3	Análisis al variar la distancia de centro a centro de los tubos y el número de tubos .....	65
5.2.2.4	Análisis al variar el diámetro de los tubos .....	67
5.2.2.5	Análisis al variar la longitud del módulo de almacenamiento.....	69
5.2.2.6	Análisis al variar la diferencia de temperaturas entre el hormigón y el fluido térmico .....	71
5.2.2.7	Análisis al variar el tipo hormigón utilizado .....	74
5.2.2.8	Análisis al variar el fluido térmico utilizado .....	76
5.2.2.9	Análisis al variar la resistencia de contacto entre la tubería y el bloque de hormigón .....	78
5.2.3	Conclusiones de diseño .....	79
5.3	<i>Prediseño de un caso práctico</i> .....	81
5.3.1	Datos de entrada. ....	81
5.3.2	Sistema que cumple con las especificaciones de diseño:.....	82
<b>6</b>	<b>Conclusiones y Resumen .....</b>	<b>85</b>
<b>Anexo 1</b>	<b>Energía termosolar de concentración.....</b>	<b>87</b>
	Concentrador solar cilíndrico parabólico.....	88
	Reflectores Fresnel .....	88
	Disco Stirling.....	89



Torre .....	89
<b>Anexo 2. Modelo EES. ....</b>	<b>90</b>
<b>Referencias .....</b>	<b>93</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

<b>Tabla 1.</b> Materiales utilizados para el almacenamiento en calor sensible [15].	8
<b>Tabla 2.</b> Materiales utilizados para el almacenamiento en calor latente. [15]	9
<b>Tabla 3.</b> Materiales que utilizan un medio de almacenamiento termoquímico [15].	10
<b>Tabla 4.</b> Propiedades de los sólidos que se utilizan como medio de almacenamiento. [16]	13
<b>Tabla 5.</b> Propiedades distintas mezclas de hormigón a distintas temperaturas. [20]	18
<b>Tabla 6.</b> Propiedades de las distintas mezclas de hormigón. [9]	21
<b>Tabla 7.</b> Composición de las mezclas de hormigones ligeros y del hormigón geo-polimérico. [9].	22
<b>Tabla 8.</b> Propiedades térmicas de las distintas mezclas de hormigón ligero. [9]	23
<b>Tabla 9.</b> Composición de las diferentes mezclas de hormigón. [10]	24
<b>Tabla 10 .</b> Principales propiedades termofísicas [10]	25
<b>Tabla 11.</b> Variaciones al utilizar diferentes intercambiadores. [8]	26
<b>Tabla 12.</b> Principales características de este sistema TES. [2]	29
<b>Tabla 13.</b> Horarios de carga y descarga de la fábrica KEAN [25]	37
<b>Tabla 14.</b> Propiedades de las dos mezclas de hormigón utilizadas para esta aplicación. [6]	40
<b>Tabla 15.</b> Tabla de propiedades del fluido térmico, aceite Paratherm NF. [6]	40
<b>Tabla 16.</b> Parámetros principales del TES para esta aplicación. [6]	40
<b>Tabla 17.</b> Resultados experimentales de los parámetros principales. [6]	42
<b>Tabla 18.</b> Temperatura del hormigón, para una temperatura del HTF variable.	51
<b>Tabla 19.</b> Temperatura media del hormigón para una temperatura del HTF constante	52
<b>Tabla 20.</b> Temperatura media del hormigón en función del tiempo para un proceso de descarga.	53
<b>Tabla 21.</b> Equivalencia distancia de centro a centro de los tubos y número de tubos.	65
<b>Tabla 23.</b> Propiedades de las distintas mezclas utilizadas para realizar la comparación.	74
<b>Tabla 24.</b> Capacidad de almacenamiento en función del hormigón utilizado.	75
<b>Tabla 25.</b> Tiempo de carga al considerar que se almacena el 95 % de su capacidad de almacenamiento.	76
<b>Tabla 26 .</b> Propiedades de los distintos fluidos utilizados para realizar la comparación	76
<b>Tabla 27.</b> Tiempo de carga estimado, utilizando fluidos térmicos distintos.	77
<b>Tabla 28.</b> Conclusiones de diseño	80

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

<b>Figura 1.</b> Aplicaciones principales a la que se destina el TES en hormigón.	1
<b>Figura 2.</b> Clasificación de los sistemas de almacenamiento según la tecnología utilizada.	2
<b>Figura 3.</b> Central hidroeléctrica de bombeo [11]	2
<b>Figura 4.</b> Niveles de diseño de un sistema de almacenamiento [15]	7
<b>Figura 5.</b> Esquema sobre el medio de almacenamiento de energía térmica.	8
<b>Figura 6.</b> Clasificación tipos de almacenamiento de energía térmica. [15]	11
<b>Figura 7.</b> Acumulador de vapor integrado en una planta de generación de vapor. [15]	12
<b>Figura 8.</b> Sistema de almacenamiento de calor en medio sólido. [15]	14
<b>Figura 9.</b> Módulo de almacenamiento de energía térmica en hormigón. [14]	15
<b>Figura 10.</b> Propiedades termo-físicas del hormigón reforzado con fibras de polietileno. [17]	18
<b>Figura 11.</b> Pérdida de masa del Heatcrete® al aumentar la temperatura en varias muestras. [12]	19
<b>Figura 12.</b> Resistencia a la compresión en muestras de Heatcrete® [12].	20
<b>Figura 13.</b> Propiedades termofísicas del Heatcrete® al compararlo con otro hormigón [12]	20
<b>Figura 14.</b> Conductividad volumétrica en función de la difusividad térmica. [9]	22
<b>Figura 15.</b> Capacidad volumétrica en función de la difusividad térmica. [9]	23
<b>Figura 16.</b> Comparación de las propiedades termofísicas de las distintas mezclas [9]	23
<b>Figura 17.</b> Distribución de temperatura en un módulo de hormigón [8]	26
<b>Figura 18.</b> Principio del sistema de almacenamiento de energía térmica [2].	27
<b>Figura 19.</b> Sistema de baterías térmicas de EnergyNest.[19]	28
<b>Figura 20.</b> Disposición de los tubos del intercambiador para un elemento de batería térmica. [12]	28
<b>Figura 21.</b> Integración del TES en una planta termosolar utilizando aceite sintético como HTF.[2]	29
<b>Figura 22.</b> Temperatura de entrada y de salida del HTF del TES en la carga y descarga. [2]	30
<b>Figura 23.</b> Energía almacenada en el sistema de almacenamiento térmico. [2]	30
<b>Figura 24.</b> Planta piloto PSIM en Abu Dabi [2]	31
<b>Figura 25.</b> Almacenamiento de energía térmica de EnergyNest [12]	31
<b>Figura 26.</b> Módulos de batería térmica con elementos térmicos en serie o paralelo. [12]	32
<b>Figura 27.</b> Almacenamiento de EnergyNest con el aislamiento que rodea los módulos. [12]	32
<b>Figura 28.</b> Medición de la temperatura y el caudal másico del HTF durante 4 días. [12]	33
<b>Figura 29.</b> Medición de las temperaturas del módulo de hormigón durante 4 días. [12]	33
<b>Figura 30.</b> Potencia y energía medidas durante 4 días. [12]	34
<b>Figura 31.</b> Temperatura de entrada/salida del TES, simulación y datos experimentales. [12]	34
<b>Figura 32.</b> Evolución de la temperatura media del hormigón y del caudal másico del HTF.[12]	35
<b>Figura 33.</b> Evolución de la energía acumulada/descargada y de la potencia.	35
<b>Figura 34.</b> Muestras de las baterías térmicas tras múltiples ciclos térmicos. [12]	36
<b>Figura 35.</b> Esquema del proyecto EDITOR y vista aérea de la fábrica de KEAN en Google Maps [24]	37
<b>Figura 36.</b> Resultados experimentales: temperatura HTF, DNI y la presión de vapor [25]	38

<b>Figura 37.</b> Temperatura media de los módulos de hormigón medida durante 6 días [25]	39
<b>Figura 38.</b> Configuración del módulo de hormigón [6]	39
<b>Figura 39.</b> Posición de los termopares en el módulo de hormigón. [6]	41
<b>Figura 40.</b> Evolución de la temperatura media del hormigón y del HTF. [6]	41
<b>Figura 41.</b> Sistema de almacenamiento térmico en hormigón con tubos inmersos en la matriz. [28]	44
<b>Figura 42.</b> Simplificación al considerar un modelo unidimensional. [28] [10]	45
<b>Figura 43.</b> Parámetros de entrada y de salida del modelo simplificado. [28]	45
<b>Figura 44.</b> Procedimiento que permite obtener las correlaciones utilizadas. [28]	46
<b>Figura 45.</b> Cálculo de volúmenes. [28]	48
<b>Figura 46.</b> Cuadro resumen de los parámetros de entrada.	50
<b>Figura 47.</b> Temperatura del hormigón en ensayos y en simulaciones de CFD. [28]	50
<b>Figura 48.</b> Discretización de la temperatura del fluido térmico.	51
<b>Figura 49.</b> Número de Reynolds, Prandtl, Nusselt, h y factores correctores	52
<b>Figura 50.</b> Número de Nusselt, Reynolds, Prandtl, h y factores correctores.	52
<b>Figura 51.</b> Evolución de la temperatura media del hormigón.	54
<b>Figura 52.</b> Módulo de hormigón elegido para comenzar el análisis paramétrico.	55
<b>Figura 53.</b> Disposición del sistema equivalente.	56
<b>Figura 54.</b> Datos de entrada que se han supuesto para el establecer un caso base.	56
<b>Figura 55.</b> Evolución de la temperatura media del hormigón en un ciclo térmico.	57
<b>Figura 56.</b> Flujo de calor intercambiado entre el hormigón y el fluido térmico.	57
<b>Figura 57.</b> Energía almacenada/liberada por el módulo de hormigón (que rodea a un solo tubo).	58
<b>Figura 58.</b> Evolución de la temperatura de salida del HTF	58
<b>Figura 59.</b> Caudal másico del fluido térmico que circula por un tubo al variar la velocidad del mismo.	59
<b>Figura 60.</b> Nusselt y Reynolds al variar la velocidad del fluido térmico.	59
<b>Figura 61.</b> Evolución de temperaturas y energías al variar la velocidad del HTF.	60
<b>Figura 62.</b> Tiempo de carga al variar la velocidad del HTF, cargando el sistema al 95 %.	61
<b>Figura 63.</b> Tiempo de carga al variar la velocidad del HTF, cargando el sistema al 90 %.	61
<b>Figura 64.</b> Valores de $Lc$ , $Ar$ al aumentar la distancia entre los tubos.	62
<b>Figura 65.</b> Valores de $\eta$ y del volumen del sistema al aumentar la distancia entre los tubos.	62
<b>Figura 66.</b> Evolución de temperaturas y energías al variar la distancia entre los tubos.	63
<b>Figura 67.</b> Capacidad de almacenamiento total al variar la distancia entre los tubos.	64
<b>Figura 68.</b> Tiempo de carga y capacidad de almacenamiento si se almacena el 95 % de la energía total	64
<b>Figura 69.</b> Tiempo de carga y capacidad de almacenamiento si se almacena el 90 % de la energía total.	65
<b>Figura 70.</b> Evolución de las temperaturas y energías al variar la distancia entre los tubos.	66
<b>Figura 71.</b> Volumen total del sistema y caudal másico del fluido térmico al variar el diámetro.	67
<b>Figura 72.</b> Reynolds y Nusselt al variar el diámetro de los tubos.	67
<b>Figura 73.</b> Evolución de las temperaturas y energías al variar el diámetro de los tubos.	68
<b>Figura 74.</b> El parámetro $Ar$ y el volumen total del bloque de hormigón al variar la longitud.	69
<b>Figura 75.</b> Evolución de las temperaturas y energías al variar la longitud.	70

<b>Figura 76.</b> Capacidad del almacenamiento al variar la longitud del bloque de hormigón.	70
<b>Figura 77.</b> Capacidad de almacenamiento y tiempo de carga si se almacena el 95 %.	71
<b>Figura 78.</b> Tiempo de carga y capacidad de almacenamiento si se almacena el 90 %.	71
<b>Figura 79.</b> Evolución de temperaturas y energías al variar la temperatura de entrada del fluido térmico.	72
<b>Figura 80.</b> Capacidad de almacenamiento al variar el salto de temperaturas.	73
<b>Figura 81.</b> Capacidad de almacenamiento y tiempo de carga si se almacena el 95 %.	73
<b>Figura 82.</b> Capacidad de almacenamiento y tiempo de carga si se almacena el 90%.	74
<b>Figura 83.</b> Evolución de temperaturas y energías al variar el material de almacenamiento.	75
<b>Figura 84.</b> Evolución de temperaturas y energías al variar el fluido térmico.	77
<b>Figura 85.</b> Evolución de temperaturas y energías variar la resistencia de contacto.	78
<b>Figura 86.</b> Tiempo de carga si se considera que el sistema almacena el 95 %.	79
<b>Figura 87.</b> Tiempo de carga al sistema si se considera que este se carga al 90 % de su capacidad.	79
<b>Figura 88.</b> Submódulo de hormigón utilizado para el prediseño del caso práctico.	83
<b>Figura 89.</b> Disposición de los módulos del sistema de almacenamiento.	83
<b>Figura 90.</b> Evolución de la temperatura media del hormigón en el caso práctico.	83
<b>Figura 91.</b> Flujo de calor intercambiado y energía almacenada por el bloque de hormigón.	84
<b>Figura 92.</b> Evolución de la temperatura de salida del HTF durante el proceso de carga y descarga.	84
<b>Figura 93.</b> Tecnologías utilizadas en plantas termosolares de concentración.	87
<b>Figura 94.</b> Esquema de una central termosolar cilindro parabólica sin almacenamiento térmico. [16]	88
<b>Figura 95.</b> Ejemplo de tablas paramétricas.	91
<b>Figura 96.</b> Ejemplo de las tablas paramétricas en las comparaciones.	92

# Notación

---

TES	Sistema de almacenamiento de energía térmica (Thermal Energy Storage)
HTF	Fluido de transferencia térmica (Heat Thermal Fluid)
CSP	Energía solar por concentración
PHES	Bombeo eléctrico (Pumped Hydro Energy Storage)
CAES	Sistemas de aire comprimido (Compressed Air Energy Storage)
BESS	Baterías (Battery Energy Storage System)
DLR	Centro Aeroespacial Alemán
CTE	Coefficiente de expansión térmica
MISP	Masdar Institute of Science and Technology
DSG	Generación de vapor
PCM	Phase Change Material (Material cambio de fase)
T <sub>ini</sub>	Temperatura inicial del bloque de hormigón
T <sub>inf</sub>	Temperatura de entrada del fluido de transferencia térmica

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Introducción

En el presente trabajo final de máster se va a desarrollar la importancia los sistemas de almacenamiento de energía térmica en medio sólido, hormigón, que se integra en una planta termosolar, las principales aplicaciones a las que se destina son: generar vapor para una fábrica que así lo requiera, obtener calor de proceso, generar frío (con una máquina de absorción) o bien generar electricidad. La figura 1 presenta un esquema que engloba las aplicaciones principales a las que se destina el sistema de almacenamiento térmico en hormigón.

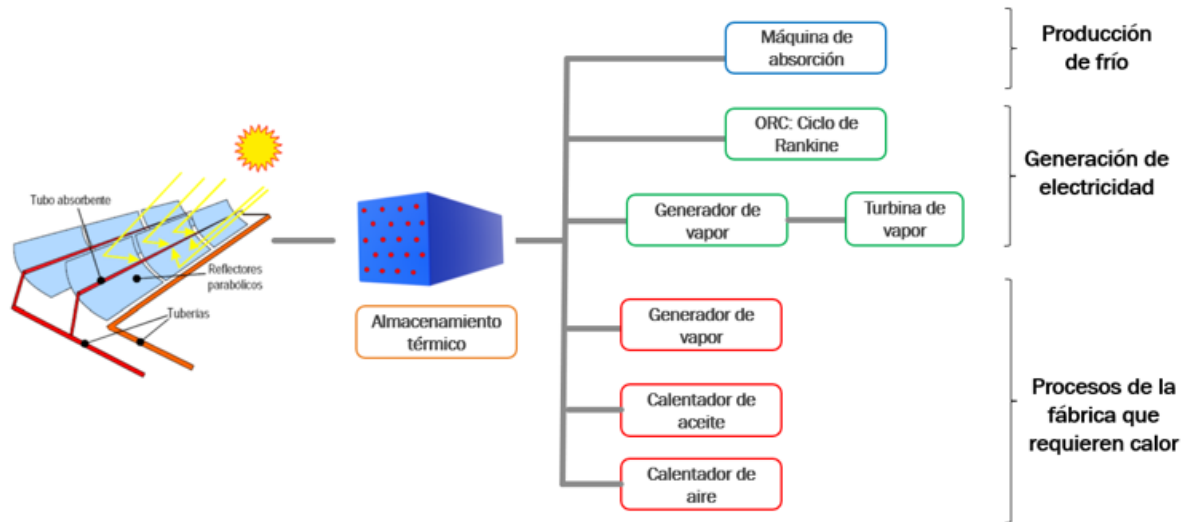


Figura 1. Aplicaciones principales a la que se destina el TES en hormigón.

Los sistemas de almacenamiento presentan múltiples ventajas entre ellas destacan:

- Permite una mejor gestión de la energía.
- Proporciona un aporte de energía estable.
- Disminuye el tiempo de arranque.
- Sirve como apoyo a otros equipos.

En cuanto a los inconvenientes que presenta, destaca el aumento de los costes de la planta al añadir un mayor número de equipos, y en consecuencia también aumenta el tamaño de la planta.

Resulta interesante ubicar el almacenamiento de energía térmica dentro de una clasificación global, es por esto que en el apartado que se presenta a continuación se recoge una breve explicación de las principales tecnologías que permiten almacenar y transformar la energía.

## 1.2 Principales tecnologías que permiten almacenar y transformar energía

Uno de los mayores inconvenientes a nivel mundial es la inexistencia de dispositivos y métodos a gran escala que permitan almacenar energía. Esto conlleva a que toda la energía que se consume o se requiere en la red eléctrica ha de ser generada prácticamente cuando va a ser consumida. La complejidad que presenta el almacenamiento de energía eléctrica conlleva a necesitar seguir alguno de los procesos que se detallan a continuación para almacenarla.

Primero ha de ser transformada en otro tipo de energía de la que poder obtener con facilidad la energía eléctrica deseada. En la figura 2, se observa un esquema que resume las diferentes tecnologías de almacenamiento que existen, de esta manera se puede ubicar el almacenamiento de energía térmica en hormigón dentro de una

clasificación global.



**Figura 2.** Clasificación de los sistemas de almacenamiento según la tecnología utilizada.

### 1.2.1 Almacenamiento mecánico

Existen diversas tecnologías que permiten el almacenamiento de energía mecánica, a partir de las cuales se puede obtener energía eléctrica. Las más empleadas a nivel mundial, debido a su rendimiento son las siguientes: El bombeo eléctrico (Sistemas PHES), los sistemas de aire comprimido (Sistemas CAES) y los volantes de inercia, a continuación, se va a explicar de forma resumida cada uno de ellos.

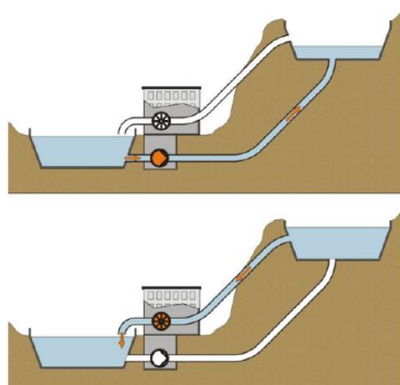
#### 1.2.1.1 Bombeo eléctrico (Sistemas PHES)

Los denominados sistemas PHES por sus siglas en inglés (Pumped Hydro Energy Storage), es el sistema de almacenamiento a gran escala más eficiente en funcionamiento, ya que proporciona gran estabilidad al sistema eléctrico y permite la generación de energía limpia con tiempos de respuesta rápidos, permitiendo corregir las irregularidades del sistema eléctrico, las principales ventajas que presentan estos sistemas son el bajo coste de la energía y la posibilidad de regular la frecuencia, esto se traduce en la obtención de una curva de la demanda más plana, ya que se turbinan en los momentos de gran demanda (horas pico) y se bombea en los momentos en los cuales la demanda es pequeña (horas valle) y por tanto hay un exceso de energía en el sistema.

Este tipo de centrales que permiten el almacenamiento están compuestas de lo siguiente:

- ❖ Un embalse superior y un embalse inferior, estos pueden ser naturales o artificiales, es decir o se aprovecha un embalse existente o se construye.
- ❖ Grupo motor-bomba/turbina-generador.
- ❖ Tubería de impulsión para el bombeo, y tubería forzada para la turbinación. También es posible tener una sola tubería funcionando en sentido ascendente o descendente.
- ❖ Conducciones eléctricas de la central a red de consumo en turbinación y de la red a la central en el bombeo.

Un ejemplo de centrales hidroeléctricas reversibles es el complejo Sir Adam Beck en las Cataratas del Niágara, Canadá. En España destacan las centrales de la Muela I y Muela II en Valencia. En la figura 3 se muestra un esquema de una central hidroeléctrica de bombeo.



**Figura 3.** Central hidroeléctrica de bombeo [11]



### 1.2.1.2 Aire comprimido (Sistemas CAES)

Los denominados sistemas CAES, por sus siglas en inglés (Compressed Air Energy Storage) permiten el almacenamiento de la energía con aire comprimido, estas instalaciones cuentan con un motor reversible que, durante los momentos de exceso de energía, almacena el aire ambiente a altas presiones en cubículos bajo tierra (acuíferos o cavidades subterráneas), la energía almacenada se libera durante los intervalos de demanda, es decir durante las horas punta, expandiendo el aire a través de una turbina. Es un sistema de almacenamiento mecánico equiparable en capacidad al bombeo hidroeléctrico.

Los sistemas de almacenamiento de energía mediante aire comprimido han estado en uso como propulsión en locomotoras utilizadas para la minería.

Para evaluar las prestaciones eléctricas de los sistemas de aire comprimido, se debe estimar la energía eléctrica que se puede generar por unidad de volumen del depósito de almacenamiento de aire. La energía de la turbina viene dada por:

$$E_{gen} = \eta_M \cdot \eta_G \cdot \int_0^t W_{CVTOT} \cdot \dot{m}_T \cdot dt$$

Donde, la integral representa el trabajo mecánico generado por la expansión del aire y el combustible en la turbina. Siendo:

- ❖  $\dot{m}_T$ : tasa de masa de aire.
- ❖  $W_{CVTOT}$ : trabajo mecánico por unidad de masa generado en el proceso.
- ❖  $t$ : tiempo necesario para vaciar por completo el depósito de aire a plena potencia de salida.
- ❖  $\eta_M$ : eficiencia mecánica de la turbina.
- ❖  $\eta_G$ : eficiencia eléctrica del generador

Los sistemas de aire comprimido se basan en dos etapas de expansión, por lo que la producción de trabajo se puede expresar como la suma de las dos etapas. En la primera etapa se considera como presión inicial la de la entrada a la primera turbina, y como presión final la de entrada a la segunda turbina. Por consiguiente, en la segunda etapa se consideraría la presión inicial la de entrada a la segunda turbina y como presión final, la de salida de esta.

### 1.2.1.3 Volantes de inercia

Los FESS por sus siglas en inglés (Flywheel Energy Storage Systems) o volantes de inercia es sistema de almacenamiento mecánico consistente en un disco metálico que comienza a girar cuando se le aplica un par motor para, a continuación, intentar frenar el volante con un par resistente conservando la energía eléctrica en forma cinética. Almacenan energía provocando el giro de una masa rodante a velocidades muy elevadas.

La cantidad de energía acumulada por los volantes de inercia viene dada por la siguiente ecuación:

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

El máximo de energía almacenada está limitado por la resistencia a la tracción del material del volante de inercia.

La máxima densidad de la energía específica  $E_{sp}$ , que puede ser almacenada en un volante de inercia depende directamente del factor de forma de dicho volante de inercia, así como de la máxima tensión soportada por el material que la compone e inversamente depende de la densidad de dicho material.

$$E_{sp} = k_s \cdot \frac{\sigma_m}{\rho}$$

Siendo:

- ❖  $\sigma_m$ : máxima tensión soportada por el material del volante
- ❖  $k_s$ : factor de forma
- ❖  $\rho$ : densidad del material del volante

Los volantes de inercia desempeñan un papel importante en la regulación primaria del control frecuencia-

potencia proporcionando una cantidad de energía en un intervalo de tiempo relativamente breve.

En el contexto de la Generación distribuida, los volantes de inercia permiten uniformizar el consumo, ya que permiten almacenar energía en las horas valle y devuelven la energía a la red en las horas punta. Por lo tanto, se reducen las pérdidas en la distribución y en el transporte y se optimiza el uso de las subestaciones existentes ya que se obtienen picos de consumo menores.

## **1.2.2 Almacenamiento químico**

A estos sistemas se les denomina como BESS por sus siglas en inglés (Battery Energy Storage System). Engloba aquellas tecnologías relacionadas con el hidrógeno y por la familia de baterías casi en su totalidad: de litio, níquel-cadmio, sulfuro de sodio, plomo-ácido, etcétera. Las baterías son dispositivos que almacenan energía en compuestos químicos capaces de generar carga eléctrica.

El almacenamiento químico presenta excelentes características en cuanto a energía y potencia específicas y por ello se encuentran extendidos dando apoyo a la regulación del voltaje y frecuencia de la red y al balanceo de la carga. Otra de las principales ventajas de las baterías es su rapidez de respuesta (milisegundos), su escalabilidad, su facilidad de instalación y los numerosos beneficios que pueden aportar a los activos renovables a los que vayan asociadas.

Existen diversos tipos de baterías electroquímicas, entre las que destacan: Las baterías de iones de litio, las baterías de titanato de litio, las baterías de flujo y las de plomo-carbono.

### **1.2.2.1 Baterías de ión-litio.**

Las baterías de iones litio, también denominadas baterías Li-Ion, son dispositivos que emplean como electrolito una sal de litio que consigue los iones necesarios para la reacción electroquímica reversible que tiene lugar entre el cátodo y el ánodo. Las baterías de iones litio presentan excelentes propiedades ya que poseen una elevada capacidad energética y resistencia a la descarga, esto unido a la ligereza de sus componentes permite que puedan funcionar un elevado número de ciclos de regeneración, y que sean acumuladores ligeros. La principal desventaja que presenta es su alta degradación frente a temperaturas extremas que limita su vida útil.

Son las baterías más extendidas en el mercado, se usan en transportes y también se montan en los submarinos convencionales alternándose con las baterías de níquel-cadmio.

### **1.2.2.2 Baterías de titanato de litio**

Esta tecnología es una variación de la anterior. Las velocidades de carga y descarga se ven aumentadas respecto a las anteriores debido al empleo de otro material, otra ventaja que presenta es que soportan mayores rangos de temperatura, degradándose en menor medida, y en contraposición la densidad energética disminuye.

### **1.2.2.3 Baterías de plomo-ácido y baterías de plomo carbono**

Las baterías de plomo ácido son de las más antiguas. Presenta ventajas tales como su bajo coste y se emplea para el arranque, iluminación y soporte eléctrico en vehículos de tamaño pequeño. Como desventaja presenta que tiene un peso excesivo y su toxicidad al emplear plomo, además necesitan revisión y reposición del electrolito que se evapora durante la recarga siendo esta lenta y costosa.

### **1.2.2.4 Baterías de flujo**

Las baterías de flujo almacenan energía en electrolitos líquidos, y esta es la principal diferencia frente a las baterías tradicionales de estado sólido como son las de iones de litio. Una batería de flujo es un dispositivo de conversión electroquímica, que aprovecha las diferencias de energía en los distintos estados de oxidación de los componentes químicos que incluye. Estos componentes pueden ser vanadio (el más común) o zinc-bromuro. Las baterías de flujo son de tres tipos principales: Redox (las más comunes), híbridas (tienen una transición entre líquido y sólido) y sin membrana (no requiere una separación de los electrolitos como pasa en el resto de las baterías).

Las baterías de flujo presentan ventajas tales como:

- ❖ Se degradan mucho menos con el uso.
- ❖ Más seguras, presentan menos riesgo de incendios y se pueden vaciar sin comprometer el estado de las baterías, esto permite que operen con ellas sea más seguro.
- ❖ Mayor capacidad energética.
- ❖ Fácilmente escalables.
- ❖ Más precisas en cuanto a medir y operar en diferentes rangos de potencia.

No obstante, también presentan ciertas desventajas:

- ❖ Mayor coste
- ❖ Incluyen fluidos corrosivos o tóxicos

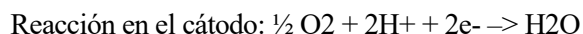
### 1.2.2.5 Pilas de combustible de hidrógeno

Una pila de combustible es un dispositivo electroquímico que transforma de forma directa la energía química en eléctrica, se trata de un tipo de almacenamiento continuo, parte de un combustible (generalmente hidrógeno) y de un comburente (en muchos casos oxígeno) para producir agua, electricidad en forma de corriente continua y calor. Se diferencia de las baterías en que el hidrógeno abastece de forma permanente la pila desde el exterior permitiendo su uso constante.

Consta de las siguientes partes:

- ❖ Electrodo (ánodo, donde se reduce el H<sub>2</sub> en dos protones H<sup>+</sup> y cátodo, donde reaccionan los protones H<sup>+</sup> y O<sub>2</sub>).
- ❖ Electrolito (separa los gases, permite el paso de iones H<sup>+</sup> al cátodo y separa los e<sup>-</sup>).
- ❖ Placas bipolares (que separan las celdas, “conducen” los gases y evacúan H<sub>2</sub>O).

Las reacciones que tienen lugar en cada uno de los electrodos son:



### 1.2.3 Almacenamiento electromagnético

De este tipo de almacenamiento destaca principalmente los superconductores, los condensadores y supercondensadores.

#### 1.2.3.1 Supercondensador

Los supercondensadores o EDLC (Electrochemical Double Layer Capacitor) son dispositivos capaces de almacenar grandes cantidades de energía eléctrica en forma de cargas electrostáticas, por lo que no hay reacciones químicas. Los supercondensadores pueden ser cargados y descargados en cuestión de segundos, siendo así ideales para responder a necesidades de puntas de potencia o a breves interrupciones del suministro, además presentan un gran compromiso entre potencia y energía específicas.

Los supercondensadores, al igual que los condensadores convencionales están formados por dos electrodos de material conductor, entre ellos se sitúa un material aislante que evita que ambos estén cortocircuitando, y se aplica una diferencia de potencial. En este material aislante se va a almacenar la energía, ya que sus partículas se polarizan según se aplica la diferencia de potencial y quedarán las cargas positivas de estas más cercanas al electrodo cargado negativamente y las cargas negativas al electrodo cargado positivamente.

#### 1.2.3.2 Superconductores o sistemas SME

Los superconductores también denominados sistemas SMES por sus siglas en inglés (Superconducting Magnetic Energy Storage) permiten el almacenamiento de energía electromagnética por superconducción. Su funcionamiento se basa en la creación de campos magnéticos mediante el uso de imanes superconductores para almacenar energía, esta energía se puede calcular mediante la siguiente ecuación.

$$E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$$

Siendo:

- ❖ L: coeficiente de autoinducción
- ❖ I: intensidad

El superconductor incluye tres partes:

- ❖ Bobina superconductora
- ❖ Un sistema electrónico de potencia
- ❖ Enfriador criogénico

El superconductor funciona de la siguiente manera: la bobina se enfría a una temperatura más baja que su temperatura crítica y con ello muestra su propiedad superconductora.

El principio básico de este tipo de almacenadores es que una vez cargada la bobina la energía puede ser almacenada indefinidamente. Para entregar la energía, la corriente que circula por la bobina se detiene cerrando y abriendo un conmutador sólido del sistema de potencia.

Estos sistemas pueden llegar a dar picos de potencia elevados en intervalos de tiempo menores de un segundo. Esto supone una gran eficiencia, debido a que las bobinas superconductoras apenas tienen pérdidas por efecto Joule, por lo que sólo se consideran las pérdidas del convertidor electrónico.

#### 1.2.4 Almacenamiento térmico

El almacenamiento de energía térmica es un método de acumulación de energía que aprovecha el calor, subiendo o bajando la temperatura de una sustancia, cambiando la fase de la sustancia o una combinación de ambos mecanismos.

Los sistemas de almacenamiento térmico presentan ciertas ventajas en comparación con un sistema de almacenamiento mecánico o químico, ya que generalmente presentan menores costos de capital en comparación con otras tecnologías de almacenamiento, así como una muy alta eficiencia operativa. Además, el almacenamiento hidroeléctrico y el almacenamiento de energía de aire comprimido requieren un tratamiento topográfico y geológico específico; las baterías son muy caras y son más adecuadas para el equilibrio de carga distribuida, el almacenamiento con hidrógeno presenta aún numerosos desafíos técnicos, además de su alto costo y baja eficiencia.

Un sistema de almacenamiento térmico puede ser integrado en distintas plantas termosolares para potenciar su máxima potencia de salida, su flexibilidad, para hacer frente a cumplir con especificaciones relacionadas con la potencia.

Un sistema de almacenamiento de energía térmica o TES (Thermal Energy Storage) consta principalmente de tres partes: el medio de almacenamiento, el mecanismo de transferencia de calor y el sistema de contención.

- ❖ El medio de almacenamiento de energía térmica almacena la misma ya sea en forma de calor sensible calor latente de fusión o vaporización (al cambiar de una fase a otra, por ejemplo, de líquido a gas) y/o de la energía involucrada en una reacción química. Esto se va a explicar a continuación con mayor nivel de detalle.
- ❖ El mecanismo de transferencia de calor, encargado de suministrar o extraer el calor del medio de almacenamiento.
- ❖ Los sistemas de contención, los cuales engloban los equipos de transferencia de energía y aísla el sistema de los alrededores.

Además, para el diseño de un sistema de almacenamiento es necesario tener en cuenta diferentes requisitos, a nivel de planta, a nivel de componente y a nivel de sistema.

- ❖ A nivel de planta, establecer ciertos requisitos y estrategias de diseño que permiten satisfacer las necesidades de la planta y la integración del sistema de almacenamiento en dicha planta.
- ❖ A nivel de componente, es necesario tener en cuenta la selección de componentes básicos del sistema

de almacenamiento.

- ❖ A nivel de sistema, se deben integrar los distintos componentes, costes, eficiencias y pérdidas, entre otros requisitos que se deben tener en cuenta, cuyo objetivo es perfeccionar el funcionamiento del conjunto.

En la figura 4, se muestra de forma más específica en un esquema qué consideraciones son necesarias tener en cuenta en cada uno de los niveles de diseño del TES.



**Figura 4.** Niveles de diseño de un sistema de almacenamiento [15]

#### 1.2.4.1 Diseño a nivel de planta.

Este estudio está orientado a los sistemas de almacenamiento térmico en hormigón que se instalan en una central termosolar, por este motivo, a la hora de diseñar un sistema de almacenamiento es necesario tener en cuenta el funcionamiento y los parámetros que van a influir en la planta termosolar y la aplicación a la que está destinada. Por ejemplo, una planta termosolar que suministra vapor a una planta de refrescos no va a necesitar el mismo sistema de almacenamiento térmico que otra planta termosolar destinada a una aplicación diferente. Es decir, es esencial el desarrollo y estrategia operacional para cumplir con los requisitos de la planta, por ejemplo, el almacenamiento a largo plazo vs el almacenamiento a corto plazo, el número de horas de funcionamiento (cada central necesitará un número diferente de horas), el proceso de carga/descarga, y cómo se integra el sistema de almacenamiento con el campo solar. Estas consideraciones a nivel de diseño se deben considerar antes que el diseño a nivel de sistema o a nivel de componente.

Por otra parte, es necesario tener en cuenta que la eficiencia de la unidad de almacenamiento depende a su vez del tipo de sistema almacenamiento, que se utilice. No obstante, será necesario tener en cuenta que la cantidad de energía eléctrica producida es función de la insolación directa normal anual ( $MWh/m^2$ ) captada por el campo solar y la eficiencia de esa captación, así como las pérdidas térmicas y la eficiencia neta del ciclo de potencia.

La presencia de un sistema de almacenamiento en una planta termosolar, afectará al rendimiento final de la planta, por lo que la incorporación de un sistema de almacenamiento requiere una evaluación tanto de los aspectos económicos como térmicos.

Es necesario tener en cuenta la importancia de la eficiencia, es decir, el sistema de almacenamiento debe ser capaz de almacenar en las temperaturas que se requieren, y ser compatible con el resto de las consideraciones de los componentes termodinámicos.

#### 1.2.4.2 Diseño a nivel de componente

El diseño a nivel de componente engloba la selección de los componentes básicos que forman el sistema de almacenamiento de energía, incluyen el material de almacenamiento, el tipo de contacto y transferencia de calor

entre el material de almacenamiento y el fluido de transferencia (HTF), así como cualquier mejora que incorpore el sistema.

En cuanto al material de almacenamiento, este debe poseer unas propiedades termofísicas específicas, tales como la densidad, el coeficiente de expansión térmico, conductividad térmica y la capacidad; unos costes, cierta estabilidad química y térmica, que garanticen que este puede soportar un número elevado de ciclos térmicos, es decir, que el material posea cierta estabilidad cíclica, también es importante tener en cuenta la disponibilidad del material y de los medios de producción. Por otro lado, es importante la cohesión entre cada selección.

En el diseño a nivel de componente tiene en cuenta si el almacenamiento se realiza en calor sensible, latente o termoquímico, en la figura 5, se muestra un breve esquema que recoge las principales características.



**Figura 5.** Esquema sobre el medio de almacenamiento de energía térmica.

#### 1.2.4.2.1 Almacenamiento en calor sensible (SHS- Sensible Heat Storage)

La energía térmica puede ser almacenada mediante el cambio de energía interna que experimenta una sustancia al modificar su temperatura, ya sea en medio sólido o líquido, sin producirse un cambio de fase en el rango de temperatura de trabajo. La cantidad de energía que permite almacenar este sistema depende de: la masa del material, el calor específico del material, y la diferencia de temperaturas entre el estado final e inicial, es decir el cambio de temperatura durante el proceso y se puede calcular a partir de la siguiente expresión:

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

En cuanto al almacenamiento de calor sensible, se pueden utilizar en medio líquido: sales fundidas, aceites minerales, aceites sintéticos, o en medios sólido, por ejemplo, cerámica, lecho de arena/roca o hormigón de alta temperatura).

En la tabla 1, se muestra un cuadro resumen sobre las propiedades de los materiales que pueden ser usados para el almacenamiento en calor sensible, detallando si este se realiza en medio sólido o en medio líquido; en él se detallan algunas de las propiedades que se deben tener en cuenta a la hora de seleccionar el material de almacenamiento según se utilice en una aplicación u otra.

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

**Tabla 1.** Materiales utilizados para el almacenamiento en calor sensible [15].

Los materiales que se usan en el almacenamiento de calor sensible son térmicamente estables a altas temperaturas, generalmente poseen un bajo costo. Comparado con el almacenamiento en calor latente, el calor específico de los materiales usados en calor sensible es de 50 a 100 veces menor.

En este estudio se va a analizar un sistema de almacenamiento en calor sensible en medio sólido, sin embargo, también se va a explicar el almacenamiento en calor latente y termoquímico, de forma breve ya que resulta de interés que se conozca.

#### 1.2.4.2.2 Almacenamiento en calor latente

En los sistemas de almacenamiento en calor latente se utilizan materiales que liberan una gran cantidad de energía cuando sufren un cambio de fase, ya que cambian de fase a una temperatura que cae dentro del rango de temperaturas de trabajo. Los posibles cambios de fase que pueden llevarse a cabo son: sólido-sólido, sólido-líquido y líquido-vapor.

El cambio de fase más utilizado es sólido-líquido ya que posee una baja expansión volumétrica en comparación con las otras, esto permite almacenar grandes cantidades de energía en relativamente bajos volúmenes.

Los materiales más utilizados en este tipo de almacenamiento deben poseer una buena estabilidad térmica y química, ya que el material no debe degradarse después de miles de ciclos térmicos ni descomponerse al calentarse.

A partir de la siguiente expresión se puede calcular la energía almacenada:

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

Siendo:

- ❖  $c_{ps}$ : Calor específico en estado sólido
- ❖  $c_{pl}$ : Calor específico en estado líquido
- ❖  $T_m$ : Temperatura del medio de almacenamiento
- ❖  $T_s$ : Temperatura del estado sólido
- ❖  $T_l$ : Temperatura del estado líquido
- ❖  $h$ : Entalpía del cambio de fase

En la tabla 2 se puede observar los materiales más utilizados para el almacenamiento en calor latente y las propiedades esenciales que se deben tener en cuenta durante la selección del material.

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

**Tabla 2.** Materiales utilizados para el almacenamiento en calor latente. [15]

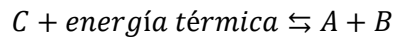
Para el almacenamiento por calor latente se suelen utilizar materiales orgánicos, ya que estos se encuentran fácilmente disponibles en la naturaleza: poseen una gran estabilidad química, no son tóxicos ni corrosivos, y se utilizan para aplicaciones en edificios y en textiles. Entre los materiales orgánicos más utilizados para el almacenamiento de energía térmica en aplicaciones comerciales se encuentra la parafina.

### 1.2.4.2.3 Almacenamiento termoquímico

El sistema de almacenamiento termoquímico es una tecnología que utiliza la energía térmica para romper los enlaces químicos de una manera reversible, este almacenamiento es ideal para grandes cantidades de energía con poca cantidad de material ya que romper este enlace requiere una elevada cantidad de energía.

El almacenamiento termoquímico ofrece una ventaja principal su alta densidad energética. La energía puede permanecer almacenada de forma indefinida sin originarse pérdidas, gracias a la naturaleza de la reacción.

En general el proceso termoquímico se basa en la siguiente reacción:



De acuerdo con dicho esquema, el material de almacenamiento termoquímico absorbe calor y se transforma en dos compuestos (A y B), pudiéndose estos guardarse de forma separada.

La reacción inversa ocurre cuando los compuestos A y B se combinan para dar lugar a C, liberando energía (proceso exotérmico).

Este tipo de sistemas no se usan como medio de almacenamiento en centrales termosolares, ya que no se puede predecir los efectos de los productos químicos en los materiales que forman el recipiente que contienen a dichas reacciones, y no se puede predecir la reversibilidad a largo plazo en las reacciones.

La tabla 3 recoge los materiales utilizados para el almacenamiento termoquímico y las reacciones que se producen para que se de este proceso.

Compound	Temperature (°C)	Reaction	$\Delta H$ (kJ/mol)	$\Delta H$ (GJ/m <sup>3</sup> )
Manganese oxide [73]	530 (at 1 bar of reactant)	$\text{MnO}_2 + \Delta H \leftrightarrow 0.5\text{Mn}_2\text{O}_3 + 0.25\text{O}_2$	42	
Calcium hydroxide [73]	505 (at 1 bar of reactant)	$\text{Ca(OH)}_2 + \Delta H \leftrightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$	112	
Calcium carbonate [73]	896 (at 1 bar of reactant)	$\text{CaCO}_3 + \Delta H \leftrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$	167	4.4
Magnesium hydride [81]	250–500	$\text{MgH}_2 + \Delta H \leftrightarrow \text{Mg} + \text{H}_2$	75	
Ammonia [82]	400–500	$\text{NH}_3 + \Delta H \leftrightarrow 1/2\text{N}_2 + 3/2\text{H}_2$	67	
Methane/Water [83]	500–1000	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$	n.a.	
Magnesium oxide [84]	250–400	$\text{MgO} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Mg(OH)}_2$	81	3.3
Iron carbonate [85]	180	$\text{FeCO}_3 \leftrightarrow \text{FeO} + \text{CO}_2$		2.6
Metal hydride [83]	200–300	$\text{Metal } x\text{H}_2 \leftrightarrow \text{metal } y\text{H}_2 + (x - y)\text{H}_2$		4
Methanolation–demethanolation [86]	200–250	$\text{CH}_3\text{OH} \leftrightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2$	n.a.	

**Tabla 3.** Materiales que utilizan un medio de almacenamiento termoquímico [15].

### 1.2.4.3 Diseño a nivel de sistema

El diseño del sistema a nivel de planta se centra en la integración de componentes como tanques de almacenamiento, bombas e intercambiadores de calor y controles para las operaciones de carga y descarga, así como en reducir las pérdidas del sistema y mejorar la eficiencia del mismo.

Los sistemas de almacenamiento de energía térmica se clasifican en dos tipos dependiendo de si el medio de almacenamiento es fluido, y es capaz de fluir entre los tanques (aceites minerales y sales fundidas), en este caso estamos ante un sistema de almacenamiento activo. Si el almacenamiento también se utiliza como medio de transferencia de calor, el sistema se denomina sistema directo-activo. Si se necesita un intercambiador adicional cuando el fluido de almacenamiento y el fluido de transferencia de calor son diferentes se le denomina almacenamiento indirecto activo.

En los casos en los que el medio de almacenamiento es sólido estamos ante un almacenamiento de tipo pasivo, en este caso el fluido de transferencia de calor solo pasa a través del material de almacenamiento para la carga y descarga.

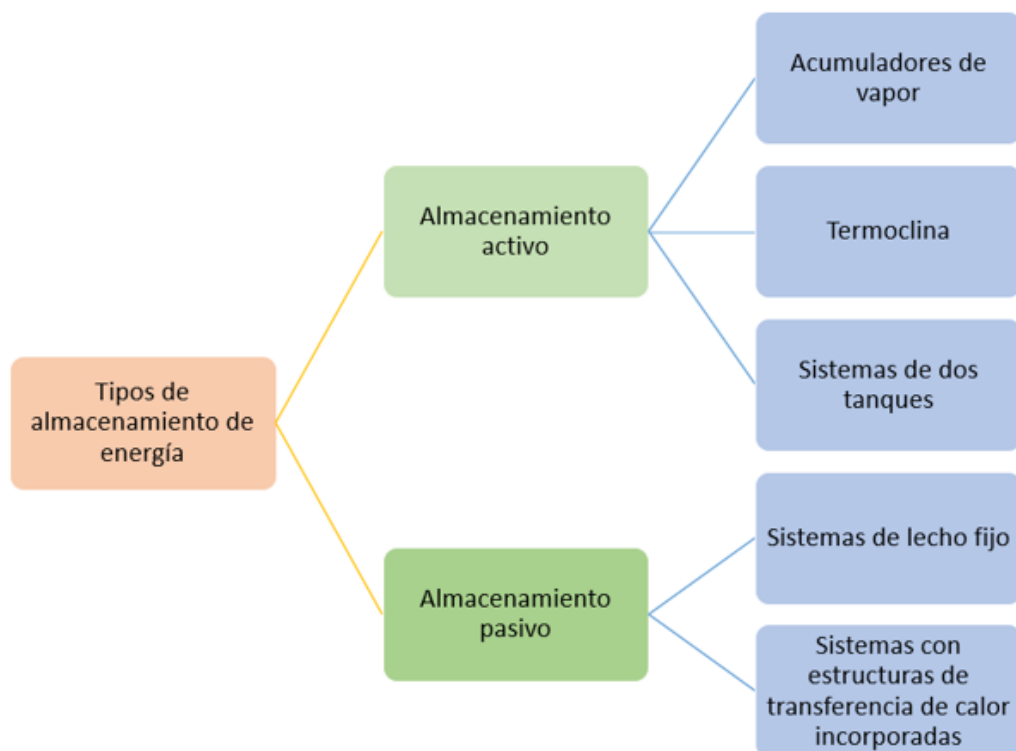
En la figura 6 se muestra un esquema en el que se puede observar los principales sistemas de almacenamiento que se integran en una planta termosolar. En el Anexo 1 se explica con detalle la energía termosolar de concentración y sus principales tecnologías.

Se debe tener en cuenta que la eficiencia y el rendimiento del sistema de almacenamiento térmico son muy importantes para determinar la eficiencia global de la planta (en este caso en la planta termosolar). El ensamblaje de los componentes seleccionados juega un papel importante a la hora de conseguir la densidad de almacenamiento prevista, así como la capacidad de carga y de descarga y a la hora de que el sistema de



almacenamiento presente un costo determinado. A nivel de sistema hay varios factores que determinan el comportamiento térmico y la eficiencia energética de la unidad. Los requisitos clave para desarrollar un sistema de almacenamiento de energía térmica son los siguientes:

- ❖ Densidad del material de almacenamiento alta.
- ❖ Eficiente transferencia de calor entre el material de almacenamiento y el fluido térmico.
- ❖ Buena estabilidad química entre el material de almacenamiento y el fluido térmico.
- ❖ Alta eficiencia térmica.
- ❖ Baja contaminación para el medio ambiente en caso de accidentes.
- ❖ Bajos costos de operación y de mantenimiento.
- ❖ Posibilidad de ampliar los diseños del TES (sistema de almacenamiento de energía).



**Figura 6.** Clasificación tipos de almacenamiento de energía térmica. [15]

#### 1.2.4.3.1 Almacenamiento activo

En un sistema de almacenamiento activo, el propio material de almacenamiento circula entre los intercambiadores de calor para transferir energía. Los intercambiadores de calor empleados también pueden ser receptores solares o generadores de vapor. Los sistemas principales de almacenamiento activo que se integran en plantas termosolares son los acumuladores de vapor, la termoclina y sistemas de dos tanques.

##### 1.2.4.3.1.1 Acumuladores de vapor

Además de utilizar aceites sintéticos y sales fundidas, se puede utilizar el agua como medio de almacenamiento en sistemas denominados acumuladores de vapor.

Un acumulador de vapor es un depósito, que suele ser cilíndrico y que normalmente se encuentra en posición horizontal, lleno parcialmente de agua. El recipiente en un principio contiene una mezcla de agua y vapor saturado a una cierta presión, y cuando se realiza el proceso de la carga, este puede influenciar de dos maneras distintas en sus condiciones operativas.

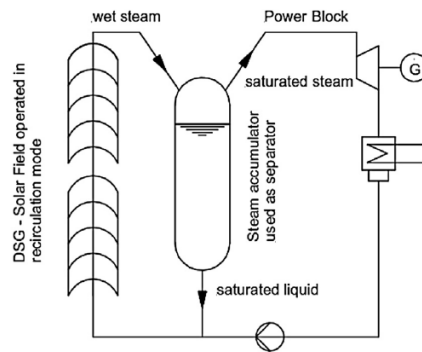
Si se carga el sistema con vapor sobrecalentado, aumenta la presión y la temperatura del tanque, produciendo

un cambio en el estado de saturación de la masa inicial.

Sin embargo, si cargamos el acumulador con líquido saturado, se mantienen la presión y la temperatura de manera constante, lo que produce un aumento del volumen másico.

Para descargar el sistema, se reduce la presión en el sistema de almacenamiento, esto tiene como resultado la producción de vapor saturado que disminuye su presión a medida que el proceso de descarga avanza.

En la figura 7 se muestra un esquema del funcionamiento del acumulador de vapor que se conecta en paralelo con el campo solar y con una planta de generación de vapor.



**Figura 7.** Acumulador de vapor integrado en una planta de generación de vapor. [15]

#### 1.2.4.3.1.2 Termoclina

Son sistemas de almacenamiento de energía activo, que utilizan un único tanque para almacenar el fluido. En este sistema la separación del fluido caliente y frío se consigue mediante el gradiente térmico vertical que se produce dentro del depósito por efecto de la diferencia de densidades. Por consiguiente, en teoría el fluido caliente permanece en la parte superior, mientras que el fluido frío en la parte inferior del tanque.

El principal problema asociado a este sistema es la dificultad práctica asociada a la separación entre el fluido caliente y el frío.

#### 1.2.4.3.1.3 Sistemas de dos tanques

Son los sistemas de almacenamiento de energía térmica activo más utilizados en la industria, basados en la utilización de dos tanques, uno caliente y el otro frío. El frío contiene el fluido de menor temperatura. Una vez que se capta, la energía solar se envía a la zona de generación, donde se utiliza para producir energía eléctrica, o se envía a un depósito caliente donde se almacena para su posterior uso. El tanque debe ser capaz de almacenar la cantidad de líquido necesaria y soportar a miles de ciclos la expansión térmica/contracción térmica asociada. Este sistema se asocia con el uso de las sales fundidas.

Las sales fundidas consisten en un 60 % de nitrato de sodio y un 40% de nitrato de potasio se han utilizado con éxito como fluido de recolección y de almacenamiento de energía térmica en diferentes plantas termosolares. Sin embargo, esta mezcla se congela por debajo de 221 °C, lo que representa un importante riesgo de solidificación local en la operación de las plantas de energía solar durante los periodos de espera. Resulta esencial evitar la solidificación de las sales fundidas, es decir la congelación ya que este hecho representa un gran coste para el sistema de almacenamiento térmico, y causaría el colapso de toda la planta, especialmente cuando se producen condiciones de funcionamiento inesperadas o interrupciones de la planta. Es por esto, que si se utilizan sales fundidas se deben incluir calentadores en los tanques de almacenamiento y en las tuberías del circuito para evitar la solidificación de la mezcla.

Se trata del sistema de almacenamiento de energía térmica a gran escala más utilizado hasta ahora en la mayoría de las aplicaciones, sin embargo, esta tecnología queda algo restringida debido a su alto costo y a su baja escalabilidad, además a esto se le suma el riesgo de que la sal se congele a altas temperaturas.

#### 1.2.4.3.2 Almacenamiento pasivo

En los sistemas de almacenamiento pasivo, también denominados regeneradores, el fluido térmico transporta la energía producida en el campo solar al sistema de almacenamiento durante el proceso de carga y recibe energía

del sistema, durante el proceso de descarga.

Estos sistemas hacen uso de la inercia térmica y de la convección natural para lograr el propósito previsto. Se utilizan sistemas de almacenamiento pasivo en aplicaciones como automóviles, transporte de alimentos, y textiles.

La tabla 4 recoge las principales propiedades de los sólidos más utilizados como medio de almacenamiento.

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

**Tabla 4.** Propiedades de los sólidos que se utilizan como medio de almacenamiento. [16]

#### 1.2.4.3.2.1 Sistema de lecho fijo

El sistema de lecho fijo utiliza como material de almacenamiento grandes conductores, como lo son las rocas, materiales de cambio de fase encapsulados y minerales. Cuando el gradiente térmico es muy bajo se utilizan las rocas como material conductor. El funcionamiento de un sistema de lecho fijo es el siguiente: el fluido de transferencia térmica fluye a través de sus elementos realizando la transferencia de calor al material de almacenamiento, el cual se encuentra en contacto directo con él. En un sistema de lecho fijo se dan distintos modos de transferencia de calor:

- ❖ Conducción entre las partículas.
- ❖ Convección entre las partículas que conforman el lecho y el fluido.
- ❖ Convección entre las paredes y fluido.
- ❖ Radiación entre el almacenamiento de energía y los equipos que hay alrededor.
- ❖ Conducción entre las paredes y las partículas.

#### 1.2.4.3.2.2 Sistemas con estructuras de transferencia de calor incorporadas

Un ejemplo de este sistema son los sistemas de almacenamiento que utilizan hormigón como medio de almacenamiento con un intercambiador de calor inmerso en su interior, por lo que para cargar el sistema el fluido que sale a altas temperaturas del campo solar atraviesa el intercambiador transfiriendo su energía al hormigón y el proceso de descarga se realiza de manera similar, pero en sentido inverso que el proceso de carga.

A la hora de seleccionar estos sistemas es importante tener en cuenta ciertas consideraciones como es la selección de materiales de alta conductividad térmica, y la compatibilidad de estos con el material de almacenamiento y con el fluido de transferencia de calor. El fluido de transferencia de calor (HTF) podría ser, por ejemplo, agua caliente/vapor o aceite térmico.

El desafío al que nos enfrentamos es desarrollar una solución que permita almacenar energía, construida a casi cualquier escala y que haga uso de materiales fácilmente disponibles y con bajo costo.

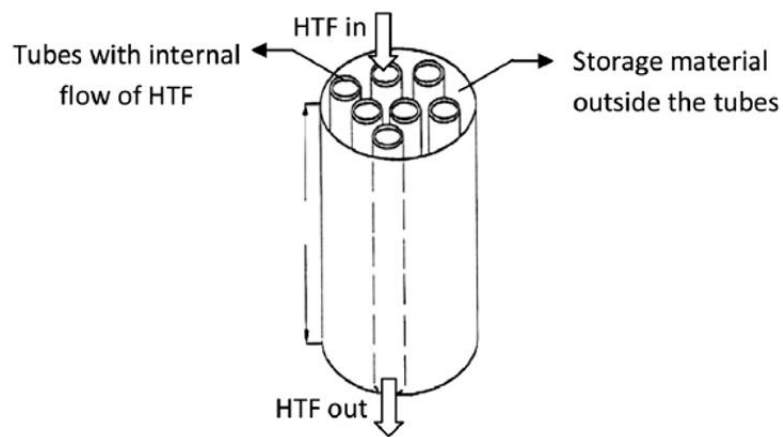
La utilidad de los sistemas de almacenamiento pasivo en hormigón ya ha sido probada en laboratorios durante la última década, y se han realizado un considerable número de experimentos con este material, incluyendo test de ciclos térmicos y de estrés. Sin embargo, no fue hasta que la construcción del sistema de producción de potencia TeraSolar I (completada a finales de 2017) que se probó esta tecnología de sistema de almacenamiento de energía pasivo a escala comercial. TeraSolar I, está ubicada en Zhangbei (China), es una planta de energía termosolar de (CSP) de 15MW desarrollada por Beijing TeraSolar Photothermal Technologies Co., Ltd. Este adopta el sistema de tecnología de generación de vapor (DSG) y utiliza un sistema de almacenamiento de energía por calor sensible en medio sólido de hormigón con una capacidad térmica máxima de 720 MWh.

Para finalizar el apartado introductorio, y centrarnos en el objeto de estudio de este trabajo final de máster, es necesario saber qué consideraciones se van a tener en cuenta a la hora de diseñar un sistema de almacenamiento

térmico, en este caso un sistema de almacenamiento térmico en medio sensible, en sólido, y en concreto en hormigón, que se va a integrar en plantas termosolares. La primera característica a tener en cuenta es la investigación de los materiales que se van a utilizar como medio de almacenamiento y si este se puede utilizar en un rango de temperatura determinado, qué características y propiedades termofísicas posee dicho material y porqué presenta ciertas ventajas al utilizarse si lo comparamos con otros materiales, la compatibilidad entre el material utilizado en el intercambiador de calor y el material del medio de almacenamiento, también hay que tener en cuenta las propiedades mecánicas que posee el material, así como su vida útil y su degradación ante los ciclos térmicos.

Los siguientes apartados se van a centrar en la selección del material, la selección del intercambiador de calor, las aplicaciones reales que han utilizado este sistema de forma comercial y los proyectos que se han llevado a cabo, así como la aplicación y el uso de un modelo matemático que permite realizar un prediseño este sistema de almacenamiento para plantas termosolares. En el Anexo 1, se explica brevemente la energía termosolar por concentración y las diferentes tecnologías que se utilizan.

La figura 8 muestra un ejemplo de un sistema de almacenamiento de energía térmica cilíndrico en el que circula el fluido térmico dentro de los intercambiadores de calor que se incorporan es su interior.



**Figura 8.** Sistema de almacenamiento de calor en medio sólido. [15]

# 2 SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN HORMIGÓN

## 2.1 Introducción

Este sistema de almacenamiento de energía térmica en medio sólido consta de un bloque de hormigón con tubos (intercambiadores de calor) inmersos en su interior, por los que circula el fluido de transferencia térmica, en la figura 9 se puede observar de manera gráfica este proceso.

En el proceso de carga al sistema, el fluido térmico transfiere energía al hormigón y en el proceso de descarga ocurre la operación inversa. A la carga y descarga del sistema se le denomina ciclo térmico y se define con detalle a continuación:

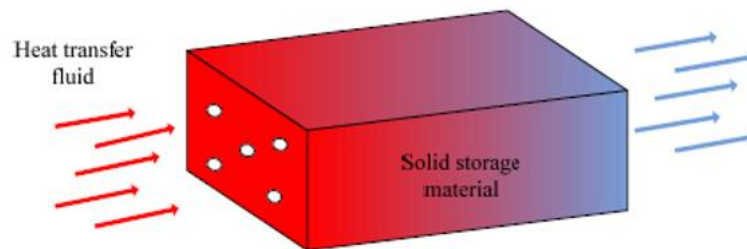


Figura 9. Módulo de almacenamiento de energía térmica en hormigón. [14]

- ❖ **Carga:** Durante el proceso de carga, la masa de hormigón (que se encuentra inicialmente a una temperatura determinada  $T_{ini}$ ) se calienta progresivamente por el fluido térmico (que proviene del campo solar) a una temperatura de entrada denominada  $T_{inf}$  ( $T_{inf} > T_{ini}$ ). El proceso de carga se termina cuando la temperatura del sistema alcanza una temperatura cercana a la temperatura de entrada del fluido térmico, y el tiempo transcurrido se denomina tiempo de carga ( $t_{ch}$ ).
- ❖ **Descarga:** El proceso de descarga es análogo, pero en este caso el hormigón se enfría mediante el fluido térmico (HTF), siendo la temperatura de entrada del fluido térmico  $T_{inf}$  ( $T_{inf} < T_{ini}$ ), se libera la energía del hormigón y el tiempo transcurrido se denomina tiempo de descarga ( $t_{dis}$ ).

Es importante evitar el contacto directo entre el hormigón y los tubos de acero embebidos en su interior, ya que podría causar tensión mecánica y grietas debido al diferente coeficiente de expansión térmica de los materiales. Esta cuestión puede resolverse añadiendo en el diseño una capa muy fina de un material intermedio adicional (grafito, por ejemplo) o dejando un espacio de aire delgado y adecuado entre la superficie exterior de los tubos y el hormigón.

A la hora de diseñar un módulo de almacenamiento de energía térmica en hormigón es fundamental tener presentes dos limitaciones:

1. La temperatura máxima del fluido térmico (HTF) a la salida del sistema de almacenamiento durante el proceso de carga.
2. La temperatura mínima del fluido HTF a la salida del sistema de almacenamiento durante el proceso de descarga.

Para aplicaciones de colectores cilindro-parabólicos que usan aceite sintético como fluido térmico el límite superior del rango de temperatura está limitado por la máxima temperatura permitida para el fluido térmico, en este caso  $\sim 400$  °C.

El mecanismo de transferencia de calor sería el siguiente para el caso de carga (en este el aceite térmico está más caliente que el hormigón:

- ❖ Convección forzada entre el aceite y la pared interior del tubo
- ❖ Conducción a lo largo de la pared del tubo
- ❖ Conducción radial y axial en el hormigón
- ❖ Conducción radial y axial entre el hormigón y el aislamiento
- ❖ Convección natural entre el aislamiento y el ambiente

Este tipo de almacenamiento tiene el inconveniente de su baja transferencia de calor entre el fluido térmico, el intercambiador y el hormigón, por este motivo es esencial realizar una elección correcta en cuanto a la geometría y disposición del intercambiador y en cuanto al hormigón que se utiliza. El hormigón utilizado normalmente es reforzado con la adición de otros componentes como el grafito o el aluminio. Se realizará un estudio más detallado en los apartados siguientes. Además, al hormigón se le añade una o varias capas aislantes normalmente suelen ser de cerámica y/o de Rockwool™.

## 2.2 El hormigón como medio de almacenamiento sólido

### 2.2.1 Ventajas e inconvenientes del hormigón como medio de almacenamiento

En el almacenamiento térmico pasivo, se utilizan medios sólidos como la cerámica, lecho de arena/roca o bien hormigón de alta temperatura; almacenar energía en hormigón presenta diversas ventajas, entre ellas destacan:

- ❖ El bajo coste del medio de almacenamiento
- ❖ El fácil procesamiento del material
- ❖ Alta disponibilidad (principales agregados disponibles en todo el mundo)

Entre sus inconvenientes destacan:

- ❖ La inestabilidad a largo plazo
- ❖ Necesidad de deshidratar el hormigón con el fin de evitar la aparición de sobrepresiones de vapor que pueden resultar peligrosas
- ❖ La temperatura del fluido térmico disminuye durante la descarga, ya que se va enfriando el material de almacenamiento, y la transferencia de calor es baja debido a que no se encuentra en contacto directo el medio de almacenamiento y el fluido térmico (HTF), es decir, se producen ciertas pérdidas ligadas al uso del intercambiador de calor.

### 2.2.2 Composición y propiedades del hormigón

#### 2.2.2.1 Composición del hormigón

El hormigón es una mezcla de cemento, grava y arena, las gravas tienen la composición mineral del tipo de roca, la arena es mayoritariamente cuarzo (90 % de sílice SiO<sub>2</sub>), y el cemento se utiliza como aglutinante.

Los principales constituyentes del cemento Portland antes de su uso en la mezcla del hormigón son CaO (z63%), SiO<sub>2</sub> (z19%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (z6%).

#### 2.2.2.2 Propiedades del hormigón

El hormigón como medio de sistema de almacenamiento de energía térmica ha sido investigado en gran medida en las universidades, como la Universidad de Arkansas en los EE.UU., la Universidad de Trento, Italia y la Universidad de Wuhan en China, también se han estudiado y realizado ensayos gracias al DLR (Centro Aeroespacial Alemán) desde 2003 hasta 2013

Los primeros prototipos probados por el DLR (Centro Aeroespacial Alemán) demostraron que el concepto de almacenamiento de energía térmica en hormigón mediante intercambiadores de calor es posible y que el material puede soportar extensos ciclos térmicos a alta temperatura (hasta 400 °C, o más) sin deformarse, agrietarse o perdiendo el vínculo con los intercambiadores de calor metálicos.

La razón principal por la que se utiliza el hormigón como medio de almacenamiento de energía térmica es la combinación entre su reducido coste y la buena conductividad térmica que presenta ya que este es un material que posee excelentes propiedades térmicas, como una alta resistencia a la compresión/tracción, un alto calor específico, un coeficiente de expansión térmica cercano al acero, una elevada resistencia mecánica para cargas de ciclos térmicos. Es un material que no es tóxico ni inflamable, no requiere de contenedor para su almacenamiento, lo que reduce más el costo. Además, los materiales basados en el hormigón ofrecen la posibilidad de modificar las propiedades físicas, térmicas, y mecánicas, mediante un diseño de mezcla orientado a cada aplicación.

Sin embargo, el uso del hormigón como sistema de almacenamiento térmico ha presentado varios desafíos: la durabilidad del módulo de hormigón tras varios ciclos térmicos, la reducción del coste del intercambiador y ciertos problemas en la carga y descarga. Se busca utilizar mezclas de hormigón que mejoren algunas de las características del material, como la reducción de las posibles grietas y una mejor conductividad térmica para mejorar la transferencia de calor.

De hecho las pruebas llevadas a cabo por el centro aeroespacial alemán (DLR) y otros fabricantes, como EnergyNest, se han centrado en comprender las propiedades térmicas y la resistencia a la fatiga de varias mezclas de hormigón a altas temperaturas, y en realizar experimentos basados en mejorar la capacidad de almacenamiento de energía, y para reducir la cantidad requerida de moldeo en las tuberías de acero, por ejemplo, utilizando agregados reciclados o adiciones metálicas a las mezclas de hormigón.

Es importante seleccionar una mezcla de hormigón adecuada que nos permita obtener la resistencia y estabilidad adecuadas a temperaturas superiores de 300° C. A altas temperaturas la humedad contenida en el hormigón puede ocasionar un grave problema, ya que induce a gradientes de presión y daños en la matriz, lo que conlleva una disminución en el rendimiento del sistema, por este motivo es importante eliminar el exceso de humedad, para ello se lleva a cabo un primer ciclo de calentamiento muy lento.

Por otra parte, el rendimiento de un sistema de almacenamiento térmico depende en gran medida de las propiedades térmicas del material, por esto es necesario estudiarlas y realizar ciertas comparaciones entre las diferentes mezclas. Resulta esencial realizar un estudio comparativo entre diferentes materiales utilizados como módulos de almacenamiento de energía ya que cuanto mayor sea el calor específico y la densidad, menor será el volumen necesario para almacenar cierta cantidad de energía, esto determina la eficiencia del sistema, así como su coste final.

#### **En resumen, es necesario tener en cuenta:**

- ❖ La importancia de eliminar el exceso de humedad
- ❖ La transferencia de calor hacia y desde un material en estado sólido puede dar lugar a gradientes de estrés térmico significativos que pueden causar grietas y dañar el material, lo que a su vez puede obstaculizar la capacidad de transferir el calor, es por esto, que resulta importante realizar un buen diseño que permita lidiar con la rápida transferencia de calor.
- ❖ Es importante tener en cuenta que cuanto mayor sea la conductividad del hormigón menor cantidad de tubos de acero se van a necesitar.
- ❖ Si se utiliza material reciclado en la fabricación de la mezcla de hormigón se va a obtener un menor impacto ambiental.
- ❖ Es importante saber que una alta difusividad térmica mejora la transferencia de calor y por lo tanto acorta el tiempo de carga y de descarga.
- ❖ Una gran capacidad calorífica volumétrica reduce el volumen de almacenamiento necesario.
- ❖ El coeficiente de expansión térmica de la mezcla de hormigón seleccionada debe ser compatible con el material del intercambiador de calor.

## **2.2.3 Cómo influye elegir un hormigón u otro en las propiedades termofísicas del TES**

### **2.2.3.1 Hormigón reforzado con fibras**

El hormigón utilizado como sistema de almacenamiento, es aquel al que se le han añadido ciertos agregados que

permiten mejorar sus propiedades, en este caso se trata de hormigón convencional al que se le han añadido fibras de polietileno, en la figura 10, se pueden observar las propiedades termofísicas de este hormigón de alta temperatura en un rango desde 25° C a 400° C.

Name	Equation	Value at 25 °C	Value at 400 °C
Density	$\rho \approx 2.25 \text{ g/cm}^3\#$		
Heat capacity	$c_p = 0.7 + 8.75 \cdot 10^{-4} \cdot T(^{\circ}\text{C})$	$c_p = 0.72 \text{ J/(g}\cdot\text{K)}$	$c_p = 1.05 \text{ J/(g}\cdot\text{K)}$
Thermal conductivity	$k = 1.467 - 6.667 \cdot 10^{-4} \cdot T(^{\circ}\text{C})$	$k = 1.45 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$	$k = 1.20 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$

# Constant value for thermal modeling, CTE =  $11.6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  at 350 °C.

**Figura 10.** Propiedades termo-físicas del hormigón reforzado con fibras de polietileno. [17]

### 2.2.3.2 Heatcrete®

Se trata de la mezcla de hormigón utilizada por la empresa EnergyNest en colaboración con Heigelberg Cement ubicada en Alemania. Esta mezcla es conocida como “Heatcrete®”. Aunque se dispone de poca información sobre la composición de este hormigón, se sabe que su principal componente es la cuarcita, un geo-material natural fácilmente disponible.

Una de las principales ventajas que presentan estos sistemas de almacenamiento térmico es su escalabilidad, esto implica que no hay límite de tamaño, es decir una instalación puede tener una capacidad de almacenamiento de varios GWh. Este medio de almacenamiento es adecuado para aplicaciones de alta temperatura, hasta 550° C, para la generación de energía eléctrica, así como para aplicaciones térmicas de temperatura moderada.

Cabe destacar que se han probado distintas aplicaciones de almacenamiento de energía térmica en hormigón, la mayoría de ellas utilizadas en plantas termosolares (CSP). El centro aeroespacial alemán (DLR) construyó y probó dos almacenes en la plataforma solar de Almería (PSA) en España, la primera de ellas usa un hormigón de alta temperatura y el segundo una cerámica fundida capacidades de almacenamiento de 280 kWh y 350 kWh respectivamente.

En la tabla 5, se comparan las propiedades del Heatcrete®, con el hormigón utilizado por el DLR (Centro Aeroespacial Alemán) y el hormigón evaluado y utilizado para los ensayos realizados por el departamento de ingeniería civil de la universidad de Arkansas (UA) para una misma cantidad de energía almacenada. Al analizar los resultados que arrojan estas pruebas se obtiene que al utilizar Heatcrete® se consigue un volumen del módulo de hormigón menor para almacenar la misma cantidad de energía. A continuación, se muestran las propiedades de las mezclas de hormigón utilizadas en este ensayo.

El dato del hormigón ensayado por el Centro Aeroespacial Alemán se obtiene a 400° C, el dato de hormigón utilizado por la universidad de Arkansas se obtiene a temperatura ambiente y el dato del hormigón Heatcrete® se obtiene 340° C.

Material properties	DLR concrete	UA concrete	Heatcrete
<b>Density (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2250	2278	2364
<b>Specific heat capacity (kWh/m<sup>3</sup>K)</b>	0,66	0,61	0,75
<b>Thermal conductivity (W/m K)</b>	1,2	2,16	2,2
<b>Crack initiation</b>	Several cracks	Micro-cracks	No visible cracks

**Tabla 5.** Propiedades distintas mezclas de hormigón a distintas temperaturas. [20]

A continuación, se explica los distintos ensayos y pruebas que se le han realizado al hormigón Heatcrete®, con el objetivo de obtener datos experimentales acerca de sus propiedades y acerca del comportamiento térmico que



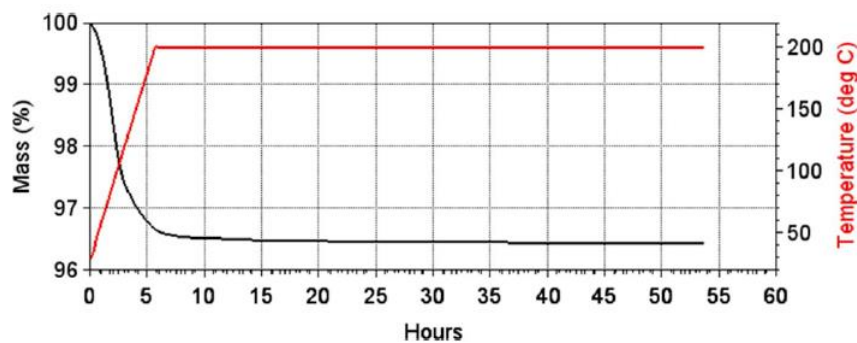
presenta esta mezcla de hormigón.

### **Pérdida de masa durante el primer ciclo térmico.**

En uno de los estudios encontrados en la literatura se han determinado experimentalmente las propiedades térmicas, utilizando un método (TPS) donde el calor específico se deriva de la conductividad térmica medida, ya que cuando los materiales de almacenamiento basados en hormigón se calientan por encima de los 100° C por primera vez, se libera agua, que después va a evaporarse, al aumentar más la temperatura, la deshidratación crea cierta porosidad, esta pérdida de masa está asociada a una pérdida de densidad durante el primer ciclo térmico.

Para este tipo de hormigón (Heatcrete®) la relación agua-cemento es muy baja, por lo tanto, la porosidad es muy baja, cuando aumenta la temperatura, esto garantiza una buena transferencia de calor y es ideal para aplicaciones de almacenamiento de energía térmica. Durante la puesta en marcha, el material debe ser calentado en un proceso lento y de manera controlada, para evitar la acumulación de vapor y la presión dentro del hormigón.

En el diagrama que se muestra en la figura 11 se puede observar la pérdida de masa, a medida que se calienta la temperatura del hormigón (Heatcrete®). Se realiza un análisis de estabilidad térmica en pequeñas muestras que se someten a un aumento de temperatura hasta llegar a los 200°C. Se muestra que la pérdida de masa se debe a la evaporación del agua libre y del agua químicamente ligada. La pérdida de masa se mantiene estable en un 3,6 % después de 15 horas.



**Figura 11.** Pérdida de masa del Heatcrete® al aumentar la temperatura en varias muestras. [12]

### **La resistencia a la compresión**

La resistencia a la compresión del Heatcrete® se midió de acuerdo con la norma EN 12390 en cilindros de fundición de 80 mm de diámetro y 160 mm de altura para registrar la fuerza máxima antes de la ruptura. Se utilizaron tres muestras para cada nivel de temperatura. Los resultados de las pruebas revelaron que la resistencia a la compresión aumenta de 45 MPa a más de 85 MPa en 28 días de proceso de tratamiento térmico, una vez que se ha obtenido esta propiedad se lleva a cabo el ensayo que se describe a continuación.

Se aumenta la temperatura de la muestra con el fin de obtener resultados acerca de cómo disminuye la resistencia a la compresión frente al aumento de temperatura. La figura 12 revela que la resistencia a la compresión se mantiene a temperaturas elevadas, esto es un resultado importante ya que demuestra que el material posee excelentes propiedades mecánicas a las temperaturas de operación del sistema de almacenamiento térmico.

### **El coeficiente de expansión del material**

El coeficiente de expansión o de dilatación térmica es esencial a la hora de diseñar un sistema de almacenamiento térmico ya que es el cociente que mide el cambio relativo de longitud o volumen que se produce cuando un cuerpo cambia de temperatura provocando una dilatación térmica. De forma general los sólidos normalmente se expanden al calentarse, este comportamiento de respuesta ante la temperatura se expresa mediante el coeficiente de expansión o dilatación térmica, esto puede producir que se agriete el material. La expansión térmica en el hormigón genera un fenómeno complejo debido a la iteración de los dos componentes principales cemento y agregados, que tiene cada uno sus propios coeficientes de expansión térmica.

Los agregados del Heatcrete® son cuarcita de alta calidad, y el coeficiente de expansión térmica resultante estará

dominado por el material agregado.

El coeficiente de expansión térmica (CTE) del medio de almacenamiento, hormigón en este caso, debe estar diseñado de tal forma que no se desvíe demasiado del CTE de la tubería de acero que está inmersa en el bloque de hormigón, ya que de esta manera se puede diseñar reduciendo la tensión termo-mecánica durante la operación a altas temperaturas.

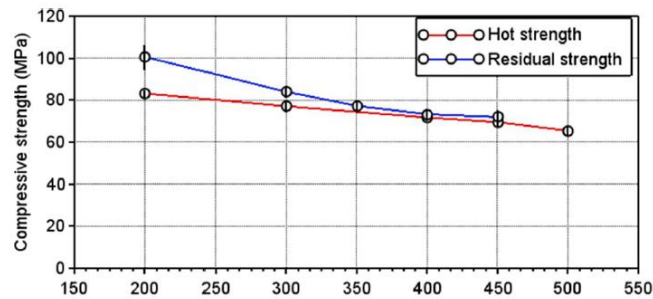


Figura 12. Resistencia a la compresión en muestras de Heatcrete® [12].

### Otras propiedades térmicas

A continuación, se evalúan a temperaturas altas las propiedades térmicas del material, por esta razón primero las muestras han sido sometidas a un tratamiento térmico de 430° C durante 100 y 500 horas en una cámara térmica, y después se han realizado los ensayos. El tratamiento térmico se realiza para asegurarnos que el agua que pueda haber en el medio de almacenamiento se ha evaporado previamente y de esta manera se obtienen valores más realistas en las pruebas.

Todas las mediciones se realizan dentro de un horno eléctrico donde la temperatura del material se equilibra durante la noche antes de la medición. El método de medición según la norma ISO 22007-2 es válido para una incertidumbre de  $\pm 5\%$  tanto para la conductividad térmica como para difusividad. Sin embargo, para materiales menos homogéneos, como el hormigón, esta incertidumbre aumenta y por lo tanto se toma una incertidumbre más conservadora de  $\pm 10\%$ . A continuación, en la figura 13 se puede observar cómo varía la conductividad térmica (a) y el calor específico (b) del hormigón Heatcrete® en función de la temperatura tras someterse a un tratamiento térmico y se comparan con las propiedades del hormigón utilizado por el Centro Aeroespacial Alemán.

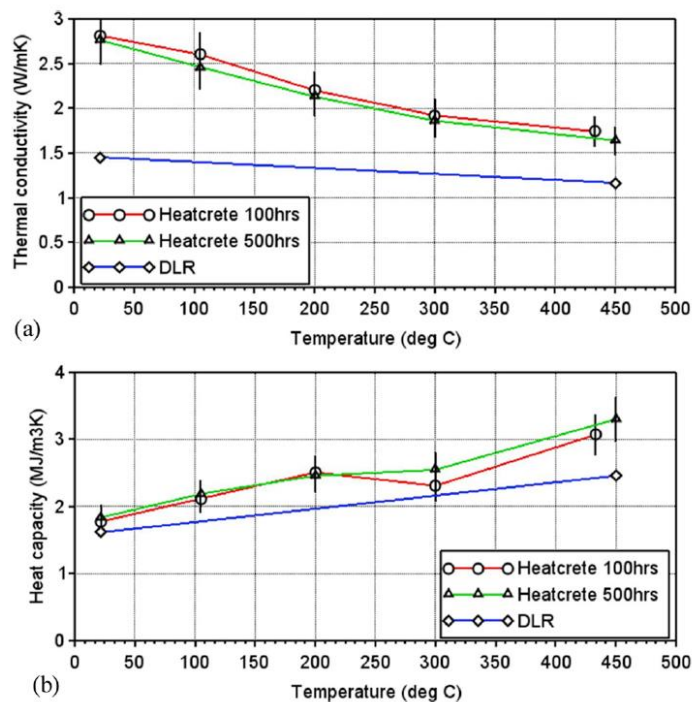


Figura 13. Propiedades termofísicas del Heatcrete® al compararlo con otro hormigón [12]

Estos datos revelan que se requerirá menor material de hormigón Heatcrete® que del hormigón probado por DLR.

### 2.2.3.3 Estudio comparativo entre diferentes mezclas de hormigón

A continuación, se realiza un estudio comparativo de diferentes mezclas de hormigón obtenidas de la literatura, y en la tabla 6 se recoge las propiedades de las mismas.

- ❖ PC (Hormigón básico): Está compuesto por grava, arena caliza y cemento Portland.
- ❖ HT (Hormigón de alta temperatura). Se trata de hormigón básico con agregados de 0,5 % (v/v) de fibra sintética reciclada
- ❖ CC (Cerámica moldeable). Compuesto por un aglutinante que contiene  $Al_2O_3$  puro, óxido de hierro y agentes acelerantes que reducen la viscosidad.
- ❖ A4. Mezcla que contiene agregados de bauxita y basalto, micro polvo de aluminio, fibras de acero y un 5% de grafito que está destinado a aumentar la conductividad térmica.
- ❖ FC: Mezcla de hormigón básico con agregados de 0,5% (v/v) de fibra sintética reciclada.

Material	Densidad ( $kg/m^3$ )	$C_p$ (J/kg K)	K (W/(m K))	$\alpha_{sol} \times 10^7$ ( $m^2/s$ )	$C_{vol}$ ( $kWh/m^3K$ )
PC	2451	810	1,02	5,14	0,551
HT	2750	916	1,00	3,97	0,700
CC	3500	866	1,35	4,45	0,842
A4	2680	950	2,43	9,54	0,707
FC	2440	630	1,16	7,55	0,427

**Tabla 6.** Propiedades de las distintas mezclas de hormigón. [9]

Se puede observar una representación más ilustrativa de las propiedades térmicas de las mezclas, en la figura 14, en ella se observan los valores de la conductividad térmica (área rectangular descrita por las líneas perpendiculares), en función de la capacidad volumétrica y la difusividad térmica de cada mezcla.

La capacidad volumétrica del material se calcula de la siguiente manera:

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

La difusividad térmica del material se calcula:

$$\alpha_{sol} = \frac{k_{sol}}{\rho_{sol} \cdot c_{sol}}$$

El eje vertical representa el comportamiento capacitivo del material (la capacidad volumétrica), mientras que el eje horizontal (la difusividad térmica) proporciona información cualitativa sobre el comportamiento de transporte de calor.

La comparación de las propiedades térmicas es de interés porque permite hacer algunas consideraciones:

- ❖ Los materiales de almacenamiento, con valores similares de conductividad térmica, pueden comportarse de manera muy diferente y el simple aumento del valor de conductividad térmica, puede mejorar de forma general los resultados térmicos.
- ❖ Un diseño adecuado de los sistemas de almacenamiento debe basarse en la selección de un material de almacenamiento de alto rendimiento térmico, de modo que se requiera un equilibrio óptimo entre el comportamiento capacitivo y de transporte de calor al medio sólido.
- ❖ Tanto la difusividad térmica como la capacidad volumétrica deben aumentar, para ello, la composición de la mezcla y la selección de los agregados desempeñan el papel más importante.

Figure 4. Thermal properties of selected storage materials.

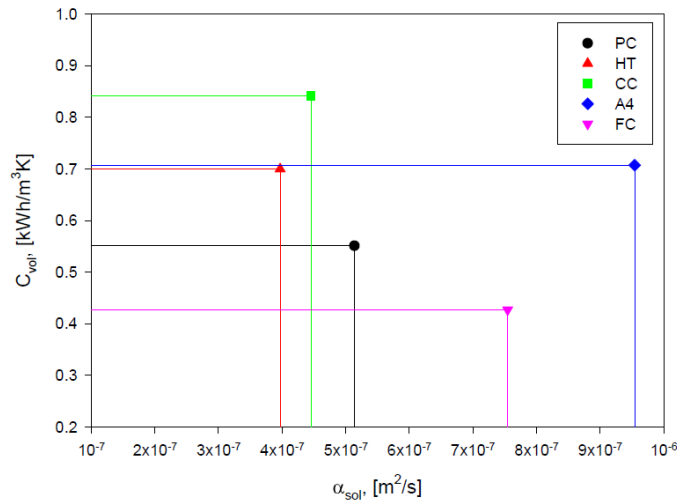


Figura 14. Conductividad volumétrica en función de la difusividad térmica. [9]

### 2.2.3.4 Estudio comparativo entre hormigones ligeros.

El estudio que se muestra a continuación consiste en comparar las propiedades térmicas de distintas mezclas de hormigón que contienen agregados de plástico, se agregan diferentes porcentajes de plástico que permiten producir hormigón ligero con diferentes capacidades y conductividades térmicas.

En la tabla 7 se muestra la composición de cada una de las mezclas. La notación PA hace referencia al hormigón convencional, el subíndice se refiere al porcentaje de agregado de plástico que contiene la mezcla y G hace referencia al hormigón geo-polimérico.

Materiales	PA <sub>0</sub>	PA <sub>10</sub>	PA <sub>20</sub>	PA <sub>30</sub>	G
Cemento Portland ( $kg/m^3$ )	300	300	300	300	-
Mármol ( $kg/m^3$ )	146	152	171	183	-
Caliza triturada ( $kg/m^3$ )	1648	1351	1227	1101	854
Agregados plásticos ( $kg/m^3$ )	0	70	140	210	-
Cenizas volantes ( $kg/m^3$ )	90	90	90	90	208
Solución alcalina ( $kg/m^3$ )	-	-	-	-	138
Superplastificante ( $L/m^3$ )	6,86	7,26	8,91	9,95	-
Ratio agua/cemento	0,5	0,5	0,5	0,5	-

Tabla 7. Composición de las mezclas de hormigones ligeros y del hormigón geo-polimérico. [9].

Cuanto mayor sea la cantidad de agregados plásticos, mayor cantidad de superplastificante se va a necesitar para compensar la pérdida de asentamiento, la cantidad de agregados de plástico influye en las propiedades térmicas, a mayor cantidad de agregados de plástico, disminuye la conductividad térmica y disminuye la densidad, y aumenta el calor específico. Esto se puede observar en los resultados de la tabla 8.

En la figura 15 se muestra una comparación de las propiedades térmicas de distintos hormigones ligeros en función de la capacidad volumétrica y la difusividad térmica.

Para la elección de un medio sólido debe considerarse el comportamiento capacitivo y de transporte de calor, en la figura 16 se observa una comparación entre los hormigones de referencia (PC: hormigón básico, HT: hormigón de alta temperatura, CC: cerámica moldeable, A4: mezcla de bauxita y basalto), ya explicados con anterioridad, y los hormigones ligeros explicados en este apartado.

Mezcla	Conductividad térmica, $k_{sol}$ (W/m·K)	Densidad, $\rho_{sol}$ ( $\frac{kg}{m^3}$ )	Capacidad de calor específico, $c_{sol}$ (J/kg·K)
PA <sub>0</sub>	1,42	2094	722
PA <sub>10</sub>	1,18	1914	743
PA <sub>20</sub>	0,94	1762	766
PA <sub>30</sub>	0,71	1518	789
G	1,01	1811	751

Tabla 8. Propiedades térmicas de las distintas mezclas de hormigón ligero. [9]

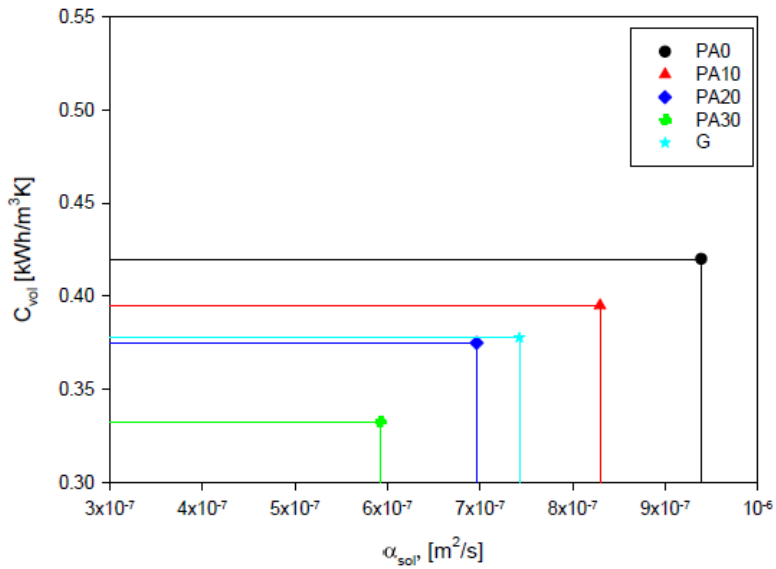


Figura 15. Capacidad volumétrica en función de la difusividad térmica. [9]

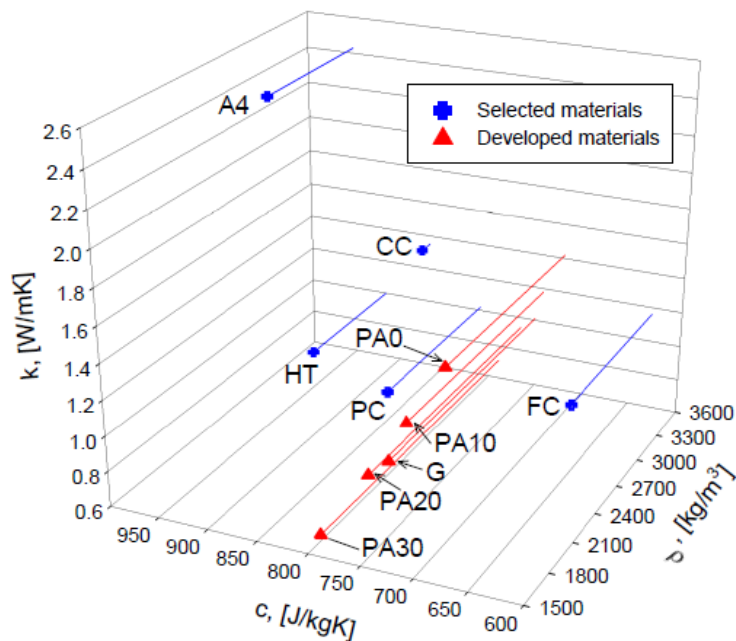


Figura 16. Comparación de las propiedades termofísicas de las distintas mezclas [9]

Como se puede observar la conductividad térmica disminuye a medida que aumenta la cantidad de agregado plástico reciclado. En la figura 16 se representan las propiedades térmicas en un espacio tridimensional tanto como para los materiales de referencia como para los hormigones ligeros objeto de estudio. Los ejes representan la densidad, el calor específico y la conductividad térmica.

### 2.2.3.5 Estudio comparativo entre distintas mezclas de hormigón

En la literatura se encuentran diversos estudios sobre las propiedades del hormigón utilizado como sistema de almacenamiento térmico, se ha encontrado un estudio que ha realizado de forma experimental diferentes mezclas de hormigón con agregado de reciclado (hormigón tipo A) y diferentes mezclas de hormigón con agregados metálicos (al que se le han añadido polvos, fibras y virutas), llamado en este caso hormigón tipo B.

Siendo:

- ❖ C: Hormigón básico.
- ❖ FC: Hormigón reforzado con fibras PA66 (poliamidas).
- ❖ CRA: Mezcla preparada con agregados reciclados.
- ❖ FCRA: Mezcla preparada con agregados reciclados y reforzada con fibras PA66.
- ❖  $C_L$ : Mezcla de hormigón liso.
- ❖  $FPC_L$ : Mezcla de hormigón con fibras de nylon PA66 procedentes del reciclaje de residuos, y polvo metálico.
- ❖  $SFC_L$ : Mezcla de hormigón reforzada con fibras de acero
- ❖  $FSC_L$ : Mezcla de poliamida recicladas y virutas metálicas.

En la tabla 9 se muestran los componentes de estas mezclas utilizadas como hormigón de alta temperatura, para aplicaciones de sistemas de almacenamiento térmicos en una planta termosolar.

De este estudio se obtienen algunos datos sobre las propiedades mecánicas que resultan interesantes por ejemplo que las fibras de Nylon disminuyen la fragilidad del hormigón, y retrasan el crecimiento de la grieta, en la tabla 10 se muestran las principales propiedades termofísicas de las mezclas de hormigón citadas en el presente estudio, medidas a temperatura ambiente.

Se puede concluir que el rendimiento de las mezclas de hormigón tipo B es mejor que los del tipo A. Por otro lado, la microestructura de las mezclas de hormigón tipo B es más compacta y presenta menos grietas después de someterse a un tratamiento térmico a 350° C. La mezcla más interesante resultó ser la que contenía fibras de poliamida recicladas y virutas metálicas (FSC<sub>L</sub>), mostrando valores de conductividad térmica iguales a 2,74 y 2,13 W/m·K antes y después de un tratamiento térmico de 4 h a 300° C. Estos valores pueden favorecer una rápida y completa recuperación del calor durante los ciclos de carga/descarga.

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

**Tabla 9.** Composición de las diferentes mezclas de hormigón. [10]

Thermal properties summary.

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

\* Measured at 25 °C.

**Tabla 10** . Principales propiedades termofísicas [10]

## 2.3 Intercambiador de calor

El intercambiador de calor que se instala en el interior de un sistema de almacenamiento de energía térmica supone una parte esencial del sistema de almacenamiento de energía térmica en hormigón. Sin embargo, el principal inconveniente en este sistema de almacenamiento es la baja transferencia de calor entre el fluido de transferencia térmica, el intercambiador y el hormigón. Es por esto por lo que resulta imprescindible elegir una adecuada geometría del intercambiador y una adecuada disposición de este dentro del bloque de hormigón.

### 2.3.1 Material del intercambiador de calor

El material más utilizado para los tubos del intercambiador de calor es el acero, el principal inconveniente, es la diferencia entre el coeficiente de expansión térmica del acero y del hormigón. El coeficiente de expansión térmica del acero es mayor que el del hormigón, este hecho produce grietas en el hormigón. Ante este inconveniente, se pueden llevar a cabo dos soluciones factibles:

- ❖ El uso de un material en la interfase entre el hormigón y el tubo del intercambiador. Los materiales adecuados para colocarse entre el hormigón y el tubo son: cinta de teflón, papel de aluminio, Deacon paste o grafito.
- ❖ Emplear tubos de acero al carbono

Como ya se ha visto en el apartado anterior, se suelen emplear tubos de acero al carbono.

### 2.3.2 Geometría del intercambiador de calor

El intercambiador de calor utilizado dentro del módulo de calor puede poseer una geometría diferente.

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

En la figura 17 puede observarse la distribución de temperaturas de tres módulos de hormigón, que cada uno tiene un tipo de intercambiador diferente en su interior (con geometrías distintas). En la imagen situada a la izquierda se trata de un intercambiador de tubos lisos, en la imagen intermedia de un intercambiador de calor con aletas en forma de barra, y en la imagen situada a la derecha un intercambiador con aletas en forma de placas.

En la tabla 11 se muestra el incremento en porcentaje de energía que se puede almacenar, el incremento del coste del intercambiador, el incremento del material, si se utilizan un intercambiador liso, o intercambiadores con diferentes aletas.

De forma comercial, se utilizan tubos lisos (un solo paso) o doble tubo en U (dos pasos), al utilizar tubos lisos toda la sección del hormigón se mantiene a la misma temperatura, por lo tanto, se somete a menos esfuerzos y a menos fatiga que al utilizar tubos en U. Sin embargo, al utilizar tubos en U se obtiene una mejor transferencia de calor.

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

Los tubos embebidos tienen una disposición dentro del módulo de hormigón en forma triangular, normalmente, por eso para el modelo simplificado que se explicará en los siguientes apartados se utiliza esta disposición. Otros sistemas de almacenamiento utilizan una disposición rectangular.

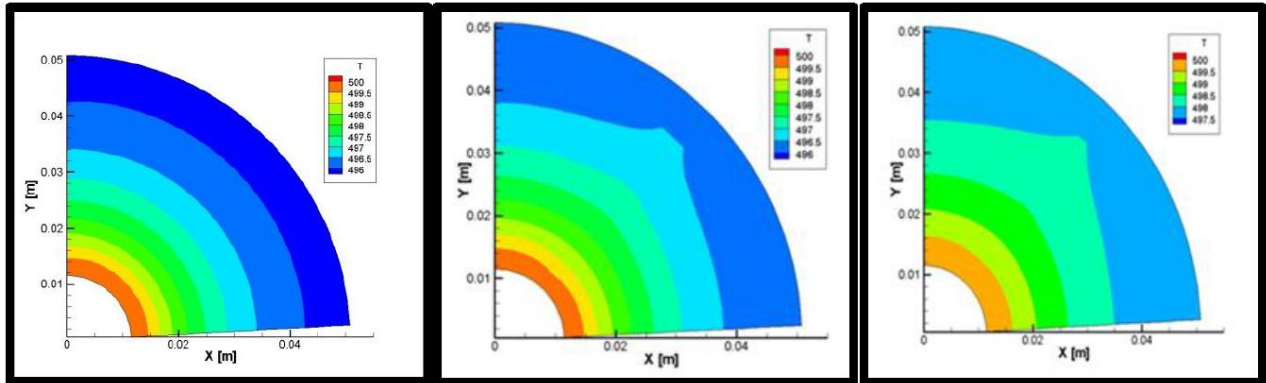


Figura 17. Distribución de temperatura en un módulo de hormigón [8]

Aletas		Incremento (%)		
Número	Tipo	Energía almacenada	Material	Coste
1	Barra	0,4	16,39	5,85
2	Barra	0,66	32,79	11,69
4	Barra	1,28	65,57	23,39
6	Barra	1,77	98,36	35,08
8	Barra	2,24	131,12	46,77
1	Disco	1,36	57,27	42,68
2	Disco	2,7	114,54	85,35
3	Disco	3,97	174,80	128,03
4	Disco	4,7	229,07	170,71
1	Plato	5,11	368,41	188,83
2	Plato	8,83	736,83	377,65
5	Espiral	9,13	268,60	382,80
6	Espiral	10,81	343,60	459,40
7	Espiral	12,19	400,91	535,90
9	Espiral	14,28	515,43	689,10

Tabla 11. Variaciones al utilizar diferentes intercambiadores. [8]



# 3 APLICACIONES INDUSTRIALES QUE UTILIZAN SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA EN HORMIGÓN

## 3.1 Introducción

El objeto de estudio del presente apartado es recopilar ejemplos de distintas aplicaciones industriales que integran un sistema de almacenamiento de energía térmica en sus instalaciones, entre ellas destaca la empresa EnergyNest, y la empresa CADE Soluciones de Ingeniería.

Las aplicaciones para las que se utilizan son distintas, en ambos casos el sistema de almacenamiento está conectado a una instalación solar, sin embargo el sistema de almacenamiento de EnergyNest se ha utilizado en proyectos en los que el sistema de almacenamiento se destina a la producción de electricidad o de calor en periodos en los que no hay irradiación solar, y el sistema de almacenamiento de la empresa CADE Soluciones de Ingeniería, se utilizó en un proyecto que está destinado a la producción de vapor en una fábrica de refrescos.

## 3.2 Sistema de almacenamiento de EnergyNest

### 3.2.1 Principio de funcionamiento del sistema y principales características

En EnergyNest, el calor es transportado hacia y desde el sistema de almacenamiento térmico usando un fluido de transferencia de calor que fluye a través de los intercambiadores de calor (tuberías de acero) integrados en el hormigón, el sistema de almacenamiento está compuesto por numerosos elementos de almacenamiento similares, el número de estos determina la capacidad total de almacenamiento de calor.

Este diseño permite que se reduzcan las tensiones térmicas al mínimo, además de utilizarse un sistema de refuerzo que reduce el riesgo de agrietamiento térmico, no hay contacto directo entre el fluido y el hormigón, la transferencia de calor se realiza a través de las paredes de acero del intercambiador de calor.

Se pueden utilizar fluidos térmicos comunes como aceite térmico, agua/vapor o gas comprimido. En la figura 18 se muestra un esquema del principio de funcionamiento de este sistema.

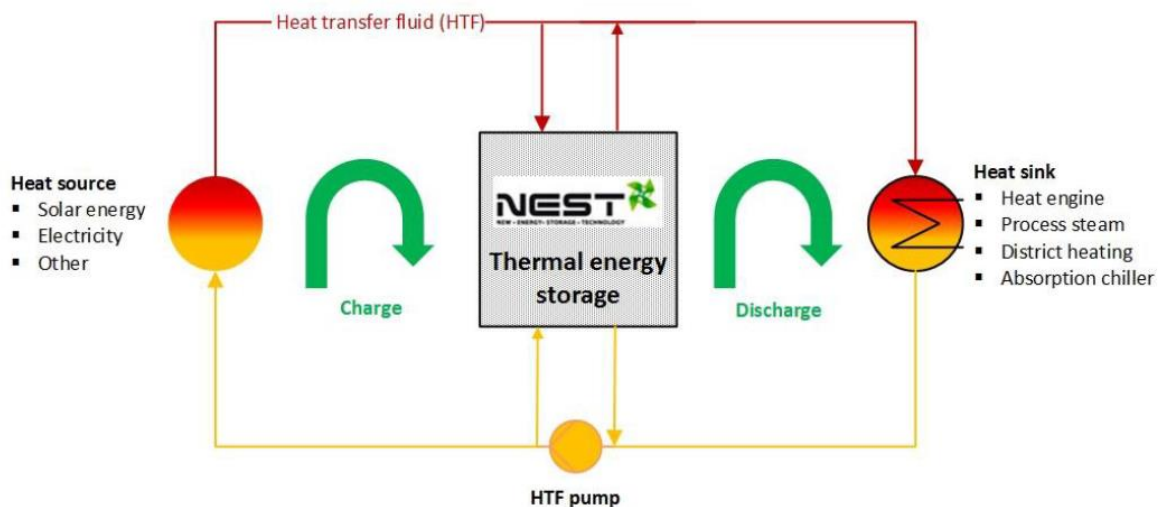


Figura 18. Principio del sistema de almacenamiento de energía térmica [2].

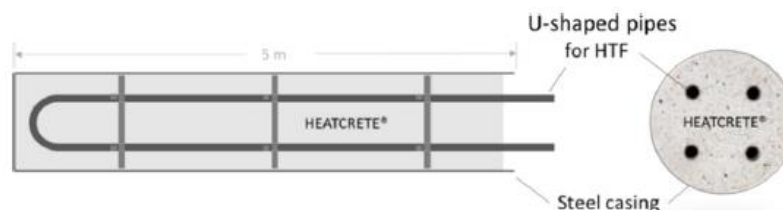
En este caso se puede observar que EnergyNest no utiliza un gran módulo de hormigón en el que se incrustan

tuberías, tal y como se había explicado hasta ahora, si no que se trata de elementos térmicos que tienen una forma cilíndrica, con una carcasa de acero muy fina (0,04 mm) cerrada en un extremo y abierta en el otro, dentro de esta se encuentra el medio de almacenamiento, llamado HEATCRETE® (hormigón cuyas propiedades se han explicado en el apartado 2.2.3.2) con intercambiadores de calor de tubo de acero integrados. Todo el conjunto forma un módulo de batería térmica, y varios módulos pueden ser conectados para formar un sistema de baterías térmicas, tal y como se muestra en la figura 19.



**Figura 19.** Sistema de baterías térmicas de EnergyNest.[19]

En la figura 20 se muestra una sección transversal de uno de los elementos térmicos. Las tuberías de cada elemento están configuradas de tal manera que el fluido térmico fluye hacia y desde cada uno de los elementos a través de dos tubos paralelos en forma de U.



**Figura 20.** Disposición de los tubos del intercambiador para un elemento de batería térmica. [12]

El proceso de trabajo de las baterías térmicas se puede resumir en tres pasos:

1. Al cargar el sistema de batería térmica, el fluido térmico caliente fluye a través de las tuberías de acero de arriba hacia abajo, transfiriendo su energía térmica al material de almacenamiento.
2. La energía se almacena con una pérdida de calor mínima hasta que se necesita.
3. Durante la descarga, el flujo se invierte y el fluido térmico frío fluye por la parte inferior y sale caliente de la parte superior de la batería térmica.

Las baterías térmicas se componen de varios módulos diseñados para facilitar el transporte, el montaje en el sitio y la mayoría de los trabajos de tuberías deben prefabricarse y probarse a presión antes de la instalación. Un sistema de tuberías y válvulas con control activo determina el flujo de HTF a través del sistema durante la carga y la descarga. El suelo, las paredes y el techo tienen una capa adecuada de aislamiento térmico de tal manera que el total la pérdida de calor será menos del 1% durante 24 horas.

Vale la pena señalar que este tipo de TES puede ser colocado casi en cualquier lugar; puede ser en una ciudad, una zona industrial, o en el mar. También puede colocarse parcial o totalmente en una estructura subterránea, de manera que el espacio superior puede ser utilizado para otros fines.

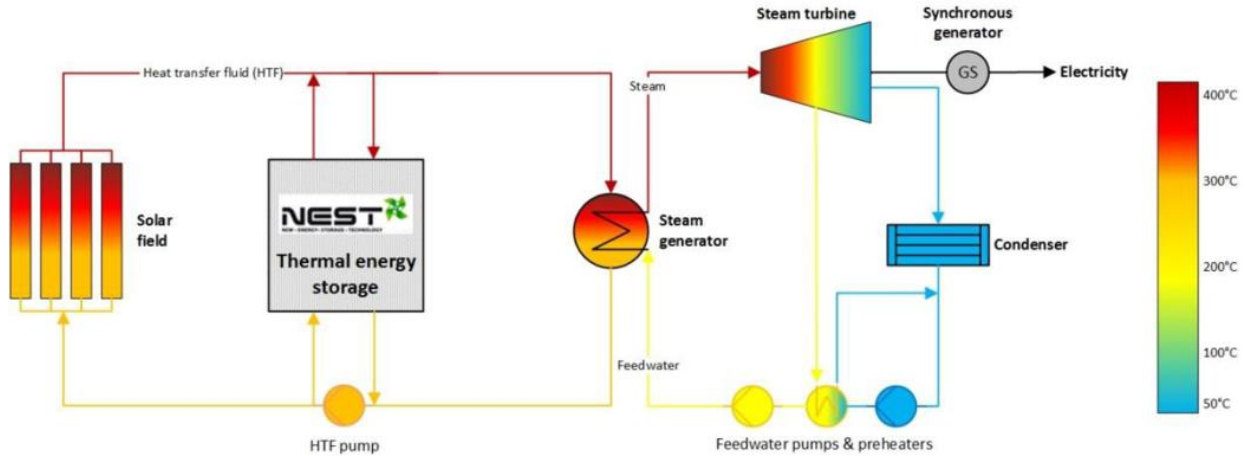
Este sistema se puede utilizar en una gran variedad de aplicaciones:

1. En la energía solar de concentración (CSP), que posee una amplia gama de aplicaciones como es la generación de electricidad, desalinización de agua salada, operaciones de minería, calor residencial o industrial. Explicada en anexo 1, ya que esta es su aplicación principal.
2. Almacenamiento de energía eléctrica térmica (E-TES) en sistemas con alta penetración de energía renovable variable como la energía eólica o la energía solar fotovoltaica (PV).

3. Obtención de calor industrial para las centrales térmicas.

### 3.2.2 Proyecto que utiliza el sistema de almacenamiento térmico de EnergyNest

En la figura 21 se muestra el esquema de un sistema de almacenamiento térmico conectado en paralelo a una instalación solar, el exceso de calor del campo solar durante el día se almacena en el sistema de almacenamiento y se puede liberar cuando el sol se pone para mantener en este caso la producción de electricidad.



**Figura 21.** Integración del TES en una planta termosolar utilizando aceite sintético como HTF.[2]

Una vez explicado el funcionamiento general y las aplicaciones en las que se utiliza, se explica con detalle las características principales del sistema de almacenamiento térmico. La tabla 12 resume las principales características que se conocen de este sistema de almacenamiento térmico.

Description	Value
Rated / maximum energy storage capacity	1.25 GWh <sub>th</sub> / 1.65 GWh <sub>th</sub>
Rated thermal power capacity	280 MW <sub>th</sub>
Volume / mass of storage medium (Heatcrete®)	30 800 m <sup>3</sup> / 67 700 ton
Footprint	4 400 m <sup>2</sup>
Height	14 m
Procurement and construction cost estimate	USD 50 million

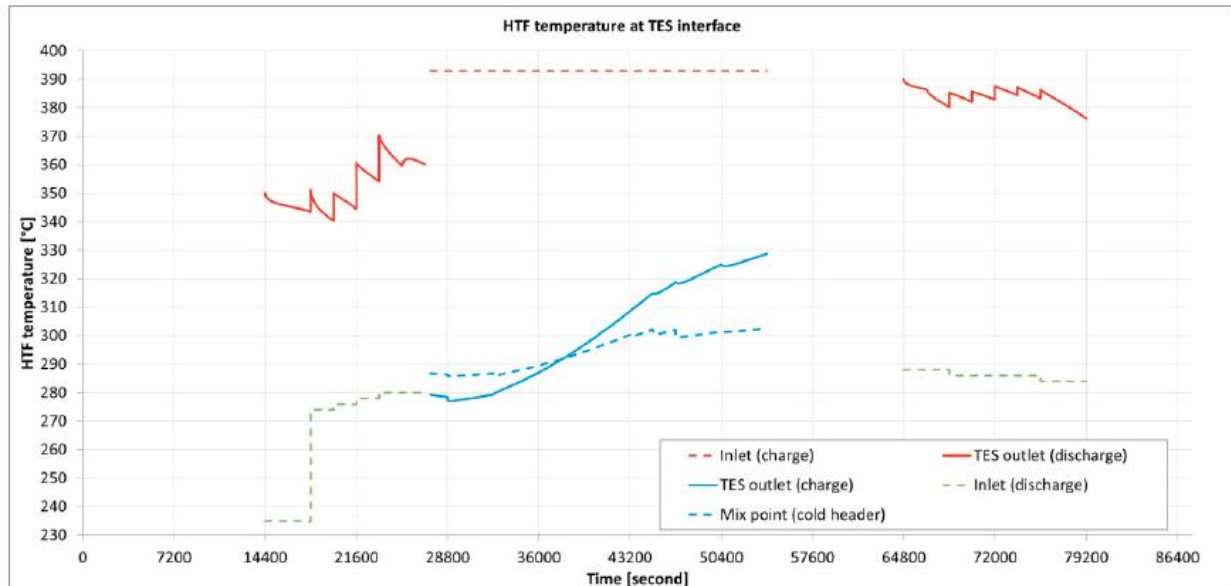
**Tabla 12.** Principales características de este sistema TES. [2]

Resulta interesante comparar este sistema de almacenamiento de energía térmica en hormigón con un sistema que utilice dos tanques de sal fundida, si ambos sistemas poseen la misma capacidad de almacenamiento en este caso 1,25 GWh, el sistema de sales fundidas va a requerir aproximadamente 36.000 toneladas de sal fundida (mezcla eutéctica de NaNO<sub>3</sub> y KNO<sub>3</sub>).

La figura 22 muestra los resultados de la simulación de un ciclo de almacenamiento de 24 horas utilizando las propiedades térmicas del hormigón, Heatcrete®. En concreto se muestra la temperatura de entrada del fluido térmico y la temperatura de salida del mismo, en un proceso de carga y descarga al sistema.

El sistema de almacenamiento térmico comienza a descargarse temprano por la mañana (t=14400) para poner en marcha la turbina de vapor y producir electricidad durante el periodo de carga. Una vez que el calor suministrado del campo solar alcanza la capacidad nominal de la turbina de vapor, el sistema de almacenamiento está vacío (t=27000), a continuación, en el instante t=28800 el sistema de almacenamiento comienza a cargarse

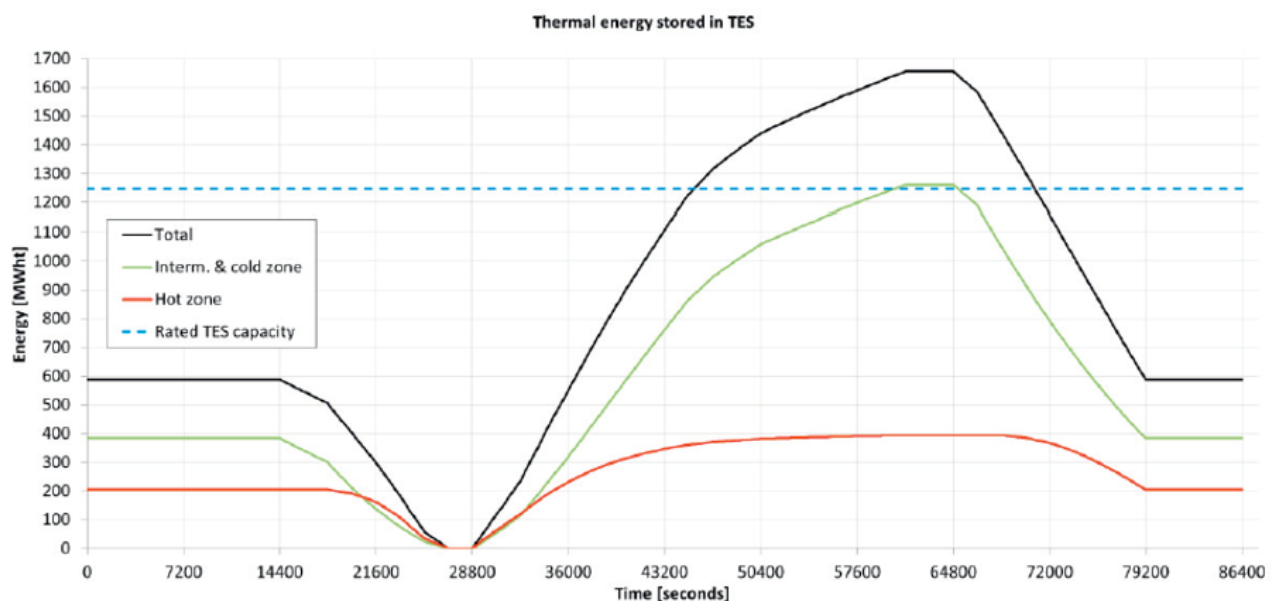
hasta  $t=54000$ . La descarga comienza cuando el calor del campo solar cae por debajo de la capacidad nominal de la turbina ( $t=64800$ ), y el calor del sistema de almacenamiento mantiene la producción de electricidad durante varias horas después de la puesta del sol.



**Figura 22.** Temperatura de entrada y de salida del HTF del TES en la carga y descarga. [2]

En este caso el TES está diseñado con dos zonas de temperatura (caliente, e intermedia/fría) para permitir el control de la temperatura de descarga. Esto permite un aumento de la temperatura por la mañana y una temperatura de salida constante durante el fin del periodo de descarga por la noche. La temperatura de salida parece ser bastante volátil en la figura que se muestra a continuación, pero esto se debe a la simulación, ya que esta no tiene en cuenta los ajustes de control de las válvulas reguladoras, realmente la curva de la temperatura sería más suave gracias a estas.

En la figura 23 se muestra la evolución de la energía almacenada en este sistema de almacenamiento térmico durante 24 horas.



**Figura 23.** Energía almacenada en el sistema de almacenamiento térmico. [2]

### 3.2.3 Proyecto realizado por Masdar Institute of Science and Technology y EnergyNest en 2015

#### 3.2.3.1 Características de la planta y del sistema de almacenamiento instalado

Masdar Institute of Science & Technology y la empresa EnergyNest iniciaron en 2015 un amplio proyecto de investigación con el objetivo de construir y probar sistema de almacenamiento térmico de EnergyNest. La planta piloto se encuentra situada en la ciudad de Masdar en Abu Dabi, Emiratos árabes, fue constituida a finales del 2014. La planta piloto se compone por colectores cilindro-parabólicos y dispone de un módulo de almacenamiento constituido por 4 unidades integradas de 250 kWh. En la figura 24 se puede observar la planta piloto.

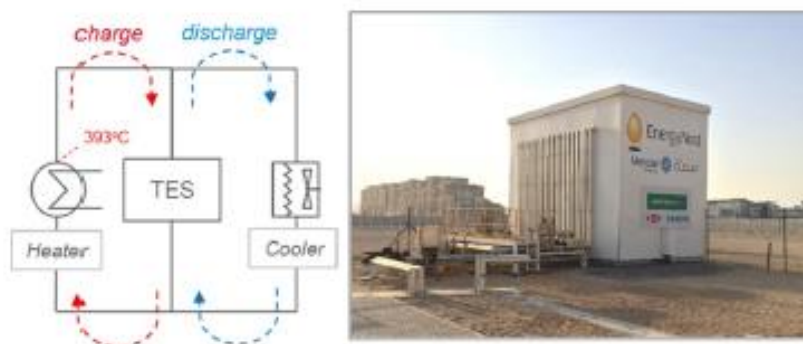


**Figura 24.** Planta piloto PSIM en Abu Dabi [2]

El sistema de almacenamiento se puso en marcha en octubre de 2015, sin embargo en 2016 se realizaron nuevas mejoras en el circuito, posteriormente la plataforma solar del Masdar Institute of Science and Technology (MISP) se dedicó a realizar pruebas del sistema de almacenamiento bajo condiciones controladas, con un fluido de transferencia de calor que se calienta para alcanzar una temperatura máxima de  $393^{\circ}\text{C}$  bajo condiciones de presión similares a las plantas termosolares de canales parabólicos. El sistema permite una gran flexibilidad en las condiciones de operación para plantas termosolares, tanto en la carga desde el campo solar como en la descarga. Este sistema se utiliza para la producción de calor. Las principales pruebas y análisis de los TES realizados durante el período de prueba fueron:

- Medir la energía almacenada y descargada y las pérdidas térmicas del sistema de almacenamiento a diferentes temperaturas.
- Medir el perfil de temperatura del fluido térmico (frío y caliente) además de la distribución de la temperatura interna durante la carga y la descarga.
- Validar el rendimiento y la capacidad de los modelos de simulación internos, basados en las mediciones físicas de más de cien sensores que posee el sistema de almacenamiento térmico.

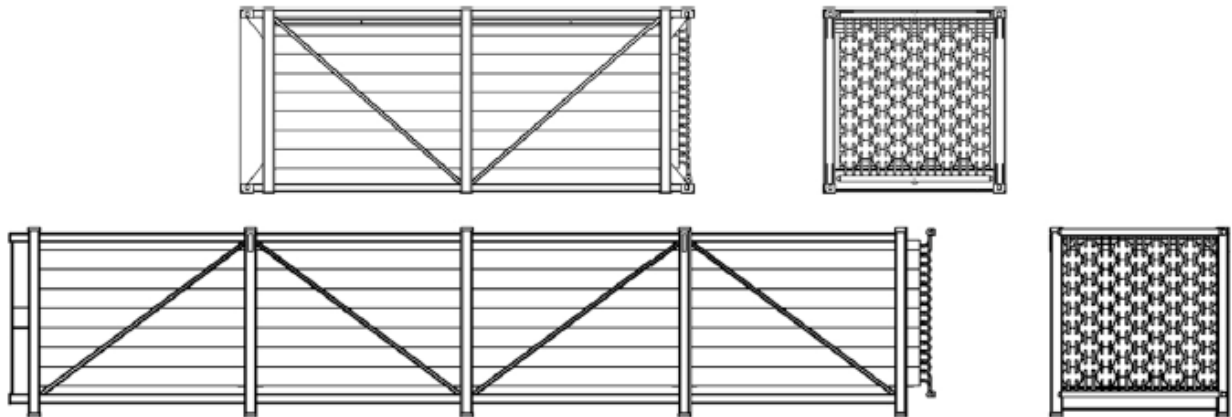
A continuación, en la figura 25, se muestra un diagrama del proyecto del sistema de almacenamiento.



**Figura 25.** Almacenamiento de energía térmica de EnergyNest [12]

Se trata de dos módulos que corresponden a contenedores de transporte de 20' y 40', estos contienen elementos térmicos de longitudes de 5 m y 11,5 m respectivamente. El diseño modular permite un apilamiento vertical de los módulos y esto se traduce en menores pérdidas térmicas generales. En la figura 26 se pueden observar los módulos de batería térmica con los elementos térmicos situados en serie o paralelo.

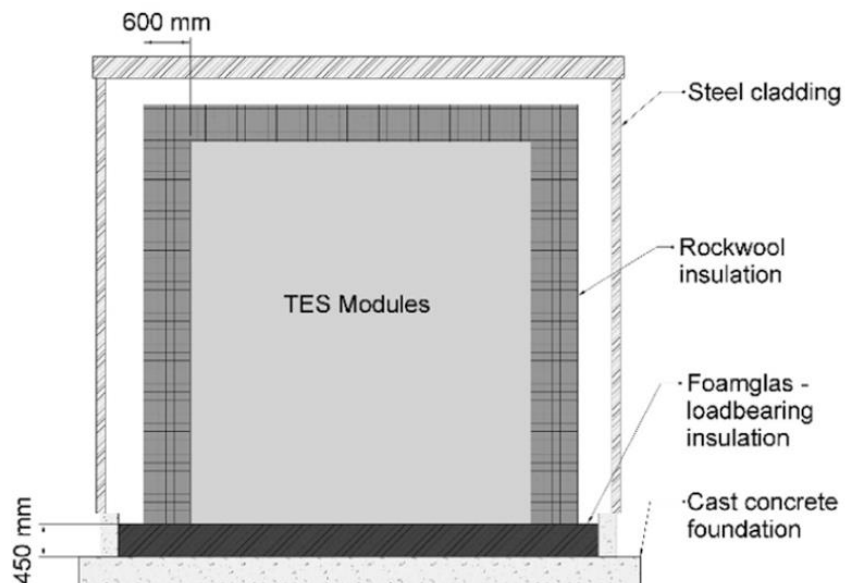
El diseño del sistema es totalmente escalable y capaz de atender a una amplia gama de requisitos de capacidad de los TES, desde unos pocos MWhth hasta varios GWhth.



**Figura 26.** Módulos de batería térmica con elementos térmicos en serie o paralelo. [12]

El sistema de almacenamiento térmico piloto instalado en MISP (Masdar Institute of Science & Technology) consiste en cuatro módulos de sistemas térmicos separados con 24 elementos de cinco metros de largo conectados en serie que pueden funcionar de manera independiente; cada uno posee una capacidad total de almacenamiento de energía de 250 kWh; la capacidad específica de cada uno de estos (incluye el material de almacenamiento, las tuberías de acero al carbono y el fluido térmico que circula por las mismas) es de 43,3 kWh/m<sup>3</sup>.

En la figura 27 se puede observar que módulos descansan sobre un aislamiento de carga de 450 mm de espesor, estos se han construido usando Foamglas, por otra parte, dentro de los módulos se utiliza perlita para aislar la serie de elementos térmicos conectados entre sí. Alrededor de los módulos se utiliza una capa de espesor de 600 mm de lana mineral como aislamiento térmico. Todo el conjunto de elementos se protege por un revestimiento de acero unido a una estructura.



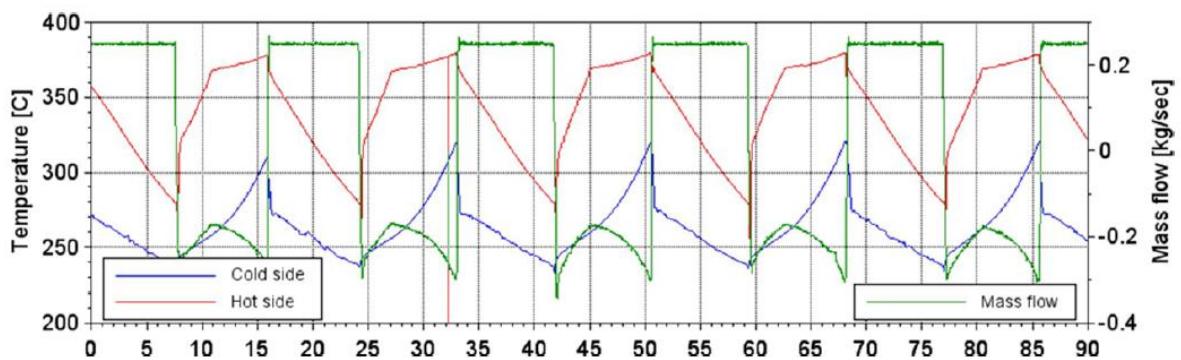
**Figura 27.** Almacenamiento de EnergyNest con el aislamiento que rodea los módulos. [12]

### 3.2.3.2 Resultados experimentales y resultados de las simulaciones

Para controlar y monitorizar el sistema de almacenamiento de energía térmica piloto, se han establecido 98 sensores de temperatura (termopares) dentro de los módulos de almacenamiento y en el aislamiento; y 32 sensores de temperatura en las tuberías por las que circula el fluido térmico. Gracias a estos se recoge la información obtenida a través de un sistema de adquisición de datos.

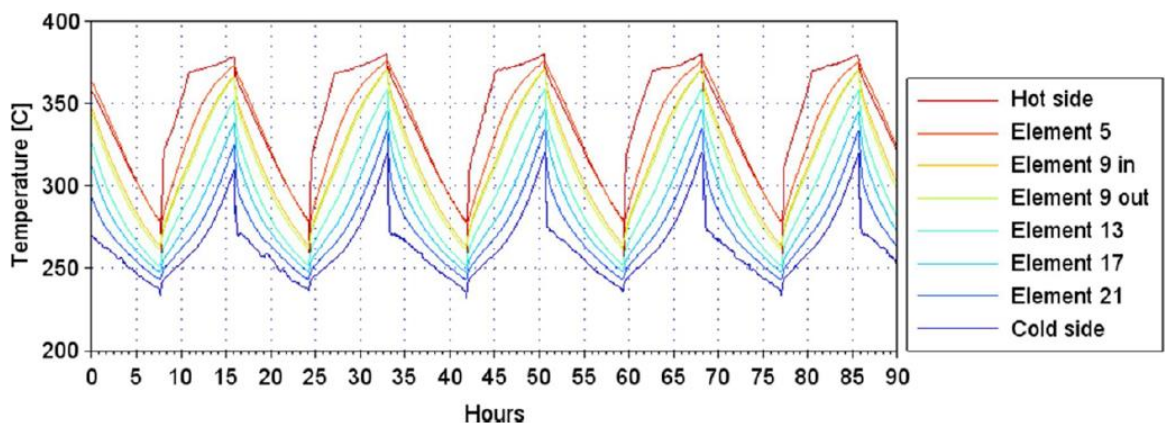
Las temperaturas de entrada del fluido térmico y el flujo de masa para los ciclos de carga/descarga durante las pruebas del sistema de almacenamiento de energía piloto se eligen basándose en un conjunto de condiciones prescritas que emulan un campo solar y un bloque de potencia en una planta termosolar típica de canal parabólico. Durante la carga se controla el caudal másico que entra al sistema para obtener una entrega constante de energía; durante la descarga, el caudal másico se mantiene constante para simular el funcionamiento típico de una planta termosolar con un generador de vapor. Esto da lugar a una disminución de la temperatura de salida del sistema de almacenamiento térmico, así como a una disminución de la temperatura de retorno del bloque de potencia simulado.

En la figura 28 muestra la temperatura del fluido térmico y el caudal másico del fluido térmico medido durante una semana de funcionamiento continuo en uno de los módulos de almacenamiento. El HTF se calienta a 390 °C en el bucle de carga mediante el calentador eléctrico, sin embargo, las pérdidas térmicas en la instalación del bucle de aceite reducen la temperatura del aceite térmico de entrada suministrada a los módulos de los sistemas de almacenamiento a unos 380 °C.



**Figura 28.** Medición de la temperatura y el caudal másico del HTF durante 4 días. [12]

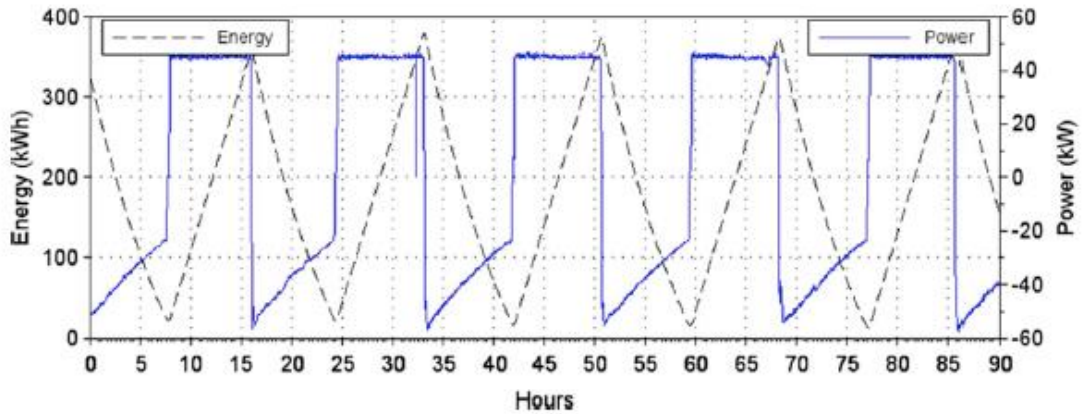
La figura 29 muestra las temperaturas internas del hormigón medidas durante el mismo periodo, gracias a los sensores que se encuentran en el hormigón. Los datos registrados muestran que los elementos del sistema térmico proporcionan una respuesta estable y repetitiva a lo largo del tiempo durante los ciclos.



**Figura 29.** Medición de las temperaturas del módulo de hormigón durante 4 días. [12]

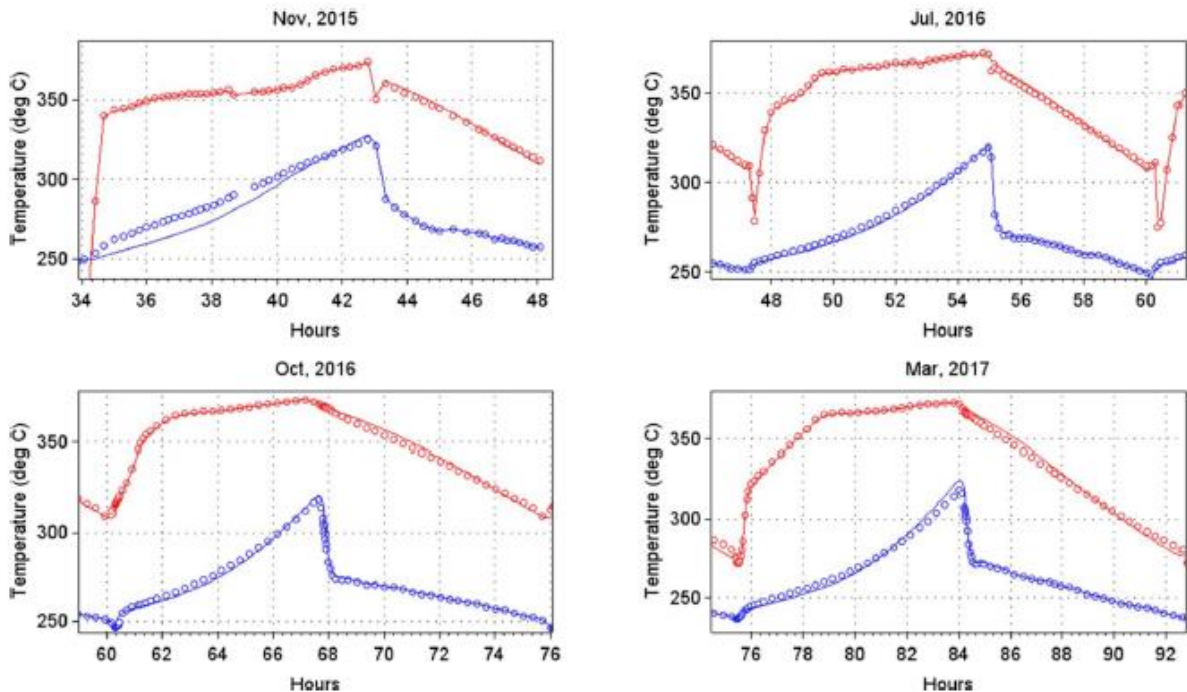
La figura 30 se muestra la energía y potencia relativas netas medidas durante cuatro días de funcionamiento continuo con aproximadamente 8:30 horas de carga y 8 horas de descarga. La energía transferida a través del

sistema de almacenamiento para este procedimiento específico de carga/descarga corresponde a una energía media de 360 kWh por ciclo, lo que resulta en una energía específica de 62,36 kWh/m<sup>3</sup>.



**Figura 30.** Potencia y energía medidas durante 4 días. [12]

En la figura 31 se muestran las comparaciones de los perfiles de temperatura (lado frío en azul y lado caliente en rojo) del fluido térmico durante la entrada/salida, y ver la diferencia entre la simulación (línea continua) y los datos experimentales (círculos). Además, se obtienen resultados que demuestran que no se ha producido bajadas en el rendimiento y que el sistema de almacenamiento es estable. Se puede observar un ciclo de carga/descarga después de que el sistema se pusiese en marcha en noviembre de 2015, también se muestran resultados en julio y octubre de 2016 y en marzo de 2017. La diferencia entre las temperaturas del lado frío medidas y simuladas durante los primeros ciclos en noviembre de 2015 se debe a las diferencias entre las condiciones de temperatura iniciales reales y simuladas del sistema de almacenamiento térmico.



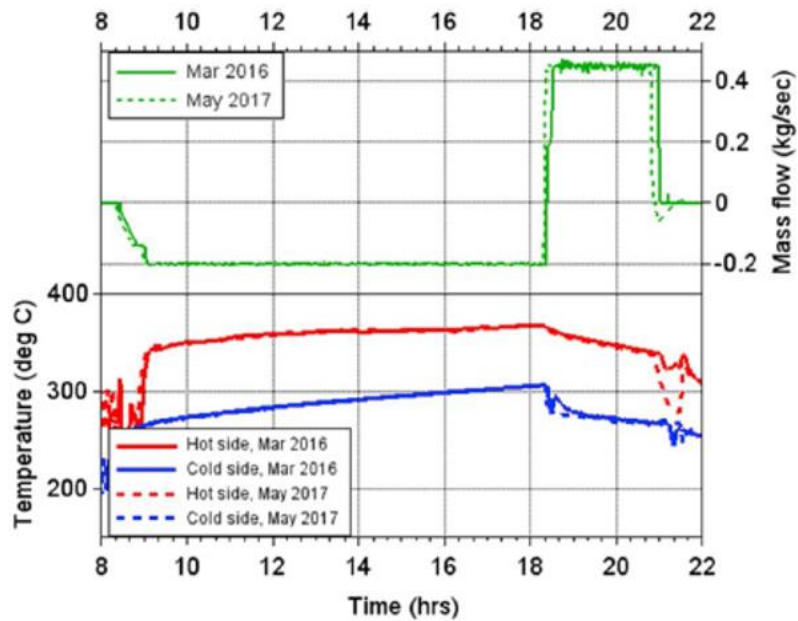
**Figura 31.** Temperatura de entrada/salida del TES, simulación y datos experimentales. [12]

Estas graficas permiten confirmar la estabilidad y solidez que presenta el sistema de almacenamiento para varios modos de funcionamiento. La diferencia entre el rendimiento simulado y el medido es marginal, y está dentro de la incertidumbre de la precisión del termopar ( $\pm 2$  °C).

La figura 32 muestra una comparación de dos ensayos, uno realizado en marzo de 2016 y otro en mayo de 2017,

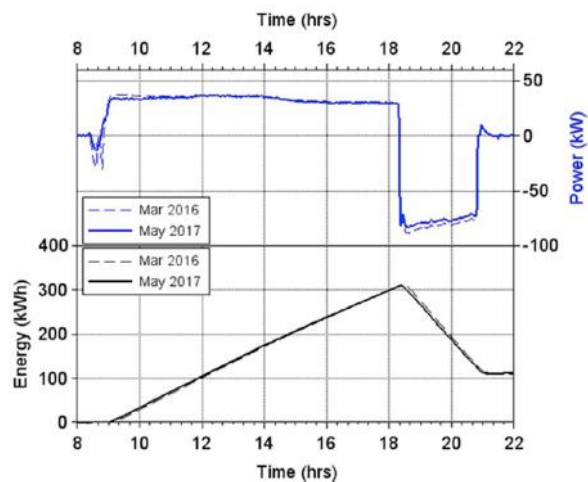


en la que se dan unas condiciones de caudal másico y de potencia casi idénticas para un ciclo completo de carga/descarga. En ella se puede observar la evolución en el tiempo de la temperatura media del hormigón y del caudal másico del fluido térmico.



**Figura 32.** Evolución de la temperatura media del hormigón y del caudal másico del HTF.[12]

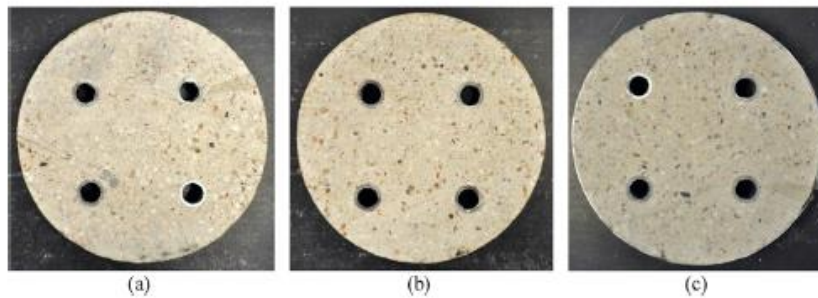
En la figura 33 se observa otra grafica que se obtiene de este estudio (de la comparación del ensayo realizado en marzo de 2016 con el realizado en mayo de 2017), esta muestra la evolución temporal de energía almacenada por el bloque de hormigón y liberada por el mismo, y la potencia suministrada.



**Figura 33.** Evolución de la energía acumulada/descargada y de la potencia.

Por último, comentar sobre esta aplicación, que se decidió drenar el sistema de almacenamiento y extraer varios elementos térmicos, con el objetivo de inspeccionar con más detalle. La inspección inicial no mostró signos de daños en el aislamiento o las tuberías del módulo de almacenamiento y de los elementos de la batería térmica. Tampoco se observaron grietas ni separación entre la tubería de acero y el hormigón.

En la figura 34 se muestran unos cortes entre 5 y 10 cm de grosor del elemento térmico; (a) “lado caliente”, (b) “lado medio”, (c) “lado frío”. Las imágenes muestran que los agregados de cuarcita se distribuyen de forma uniforme, no hay ninguna degradación, o agrietamiento del material. Además, el aspecto físico de las muestras es idéntico al del laboratorio que han sido secadas en horno a altas temperaturas durante largos periodos.



**Figura 34.** Muestras de las baterías térmicas tras múltiples ciclos térmicos. [12]

El segundo estudio encontrado en la literatura se centra en la degradación de las propiedades mecánicas que sufre el hormigón durante los ciclos (carga y descarga), se demuestra que los gradientes de tensión termo mecánica en la dirección axial de los elementos son mínimos ya que el gradiente de temperatura dominante está en la dirección radial. La delgada carcasa cilíndrica de acero actúa como una fundición permanente (permanece en su lugar durante toda la vida de la batería y representa una geometría óptima para el refuerzo y soporte del elemento térmico.

Se analiza que no hay ninguna otra condición de carga significativa que no sea la expansión y contracción térmica asociada al calor de transferencia desde y hacia los intercambiadores de calor, esto significa que la tensión resultante de la expansión y contracción se puede denominar “carga proporcional” es decir las direcciones de tensión no van a rotar durante el ciclo térmico, esto es beneficioso ya que no se producirá cizalla a través de las posibles grietas.

Se demuestra que las fuerzas de transferencia entre los dos materiales son independientes de la longitud del elemento térmico y solo depende de la diferencia de expansión térmica entre los materiales, la diferencia de temperatura, el módulo elástico de cada uno de los materiales y el área de la sección transversal de los dos materiales.

Este resultado resulta muy interesante ya que permite que la longitud del elemento térmico no sea determinante y se pueda adaptar para crear módulos que sean compatibles con el contenedor en el cual se van a insertar las distintas baterías térmicas, esto va a facilitar el transporte y la manipulación de las mismas.

### 3.3 Proyecto EDITOR y el sistema SOLIDTES.

#### 3.3.1 Localización y esquema del proyecto, principales características del mismo

Se trata de un proyecto ubicado en la isla de Chipre, posee una localización idónea para la producción de calor mediante generación solar de concentración, ya que la isla ofrece excelentes condiciones de irradiación solar, su construcción fue finalizada en septiembre de 2018, el objetivo de este proyecto es automatizar la producción de vapor para suministrarla a la fábrica de refrescos KEAN Soft Drinks Ltd. Gracias a este proyecto se puede reducir el consumo de combustibles fósiles consumidos por la caldera de gas de la fábrica y por lo tanto permite reducir los costos de combustible y las emisiones de CO<sub>2</sub>. Este sistema está fabricado por la empresa Protarget AG, Alemania y el sistema de almacenamiento térmico por CADE Soluciones de Ingeniería, S.L, España.

El proyecto EDITOR, ocupa una superficie total de 1250 m<sup>2</sup> y está compuesto por lo siguiente:

- ❖ Campo solar con unas dimensiones de 50 m x 12 m, compuesto por dos filas de colectores cilindro-parabólicos.
- ❖ Dos contenedores estándar de 20 pies para el almacenamiento de energía térmica en hormigón.
- ❖ Un contenedor estándar de 20 pies para alojar la caldera de vapor (tipo Kettle), la bomba de aceite térmico y el sistema de control.

El instituto solar de Jülich (SIJ) simula todo el sistema del campo solar (canales parabólicos) con almacenamiento térmico en hormigón para la generación de vapor, el modelo de simulación que llevan a cabo se realiza utilizando el lenguaje Modelica®. En el esquema que se puede observar en figura 35 muestra un campo solar con concentradores cilindro parabólicos de dos filas y un sistema de almacenamiento térmico de

dos módulos (TES 1 y TES 2), una caldera y una bomba que impulsa el aceite térmico.

En los puntos T1 y T2 se realizan mediciones de la temperatura; cada uno de los módulos del sistema de almacenamiento térmico, consisten en dos submódulos aislados de 5 m de longitud cada uno, colocados uno al lado del otro en un contenedor de transporte. Cada submódulo está diseñado con 20 tubos dispuestos en una matriz de 5x4. El sistema de almacenamiento tiene una capacidad de 600 kWh, el sistema de canales parabólicos está equipado con un novedoso elemento colector. El aceite térmico que se utiliza es HELISOL XA, que puede ser calentado a 425° C.

El sistema de almacenamiento de la fábrica de KEAN tiene una capacidad de 600 kWh, al ser un sistema de almacenamiento pequeño, es posible enviarlo en contenedores.

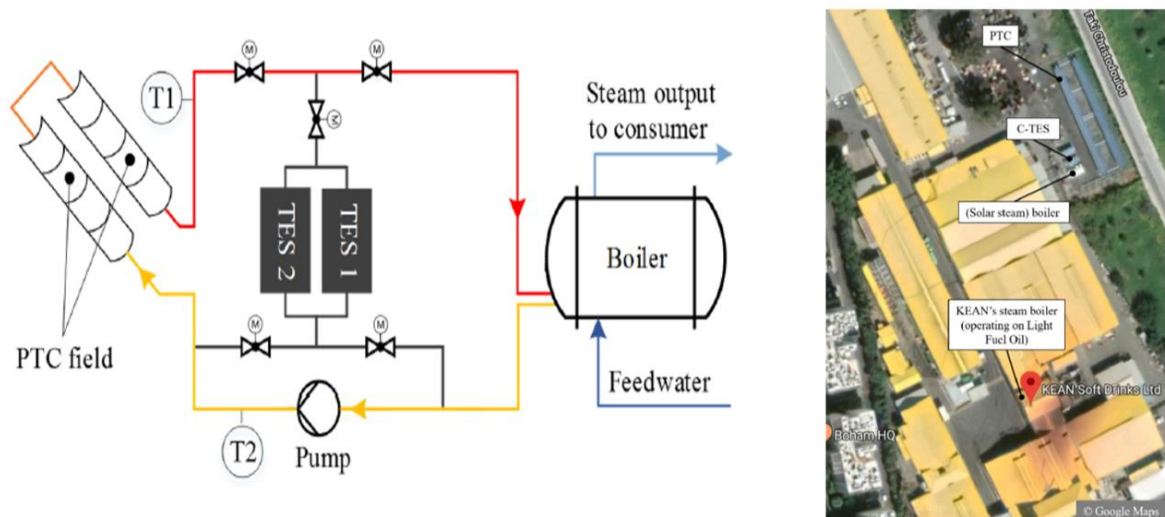


Figura 35. Esquema del proyecto EDITOR y vista aérea de la fábrica de KEAN en Google Maps [24]

### 3.3.2 Principio de funcionamiento del sistema automatizado, modos de funcionamiento.

El funcionamiento de la planta solar es totalmente automático y esto se consiguió desarrollando varios modos de funcionamiento y estrategias de control. Los modos de funcionamiento debían respetar los límites de temperatura y presión, los efectos transitorios al pasar de un modo a otro, las variaciones de la irradiación solar y las variaciones de demanda del consumidor, en este caso la demanda de vapor depende del día de la semana y de la carga de trabajo.

En dicha automatización se ha tenido en cuenta la generación de energía, la carga y descarga del sistema de almacenamiento y el precalentamiento del campo solar. Durante las primeras pruebas que se realizaron se demostró que es posible la producción de vapor en las primeras horas de la mañana antes de la salida del sol mediante la descarga del sistema de almacenamiento, de acuerdo con el programa de producción de Kean, el vapor se produce a las 5:30 horas. También se ha investigado el comportamiento operativo de la caldera de vapor, se ha probado el tiempo de calentamiento con diferentes niveles de agua.

La planta está completamente puesta en marcha y está en funcionamiento ininterrumpido desde marzo de 2019. La temperatura máxima del aceite térmico a la que funcionó la planta fue de 415 °C. Sin embargo, para los requisitos específicos de la fábrica de KEAN, se eligió una temperatura nominal de funcionamiento de 350 °C

Dependiendo de la carga de trabajo, el turno de la fábrica es de 8 o 16 horas. Durante la semana, la caldera de vapor debe ponerse en marcha con suficiente antelación antes de que comience la producción de zumo.

La estrategia de los días de la semana se resume en la tabla 13.

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

Tabla 13. Horarios de carga y descarga de la fábrica KEAN [25]

### Modos principales de funcionamiento:

- ❖ Descarga del sistema de almacenamiento: el fluido de transferencia de calor (HTF) fluye desde el sistema de almacenamiento directamente a la caldera para producir vapor antes de la salida del sol, al principio esto se realiza con un caudal másico bajo ya que se pretende proteger al hormigón de los choques térmicos, y a continuación se aumenta el caudal másico del aceite térmico para proporcionar la potencia necesaria para que la caldera produzca vapor de manera constante.
- ❖ Precalentamiento del campo solar: Este modo ajusta las dos hileras de colectores cilindro-parabólicos del campo solar al seguimiento del sol, de forma que el HTF se calienta hasta el valor de temperatura deseado para la generación de vapor constante.
- ❖ Generación de vapor solar: En condiciones de sol durante el día, el HTF se calienta en el campo solar y transfiere la energía térmica al agua de la caldera. La caldera produce vapor saturado y lo introduce en el sistema de tuberías de vapor de la fábrica KEAN. Los parámetros del vapor son controlados por el sistema principal mediante el control de la cantidad de energía que pasa a través de la caldera. El control funciona con un controlador PID que ajusta el caudal másico, las temperaturas de entrada y salida del fluido térmico y el seguimiento del colector del sistema, en función de la cantidad de irradiación normal directa.
- ❖ Carga del sistema de almacenamiento, en este modo el fluido térmico fluye desde el campo solar hasta el sistema de almacenamiento, transfiriendo la energía recogida a la matriz de hormigón. La carga tiene lugar con un caudal másico reducido o con un caudal másico máximo. El sistema de almacenamiento tiene limitaciones térmicas que deben respetarse para evitar un choque térmico en los tubos de acero y en el hormigón.

Por lo tanto, durante un mínimo de 10 minutos después de iniciar el modo de carga, la diferencia de temperatura inicial entre el HTF que entra en los bloques de almacenamiento y la temperatura media de los bloques no debe superar los 50 °C. Después de la fase de calentamiento el sistema de almacenamiento puede cargarse a plena potencia térmica suministrada por el campo solar. La diferencia de temperatura límite ahora se incrementa a 100° C.

### 3.3.3 Resultados de las simulaciones y de los ensayos realizados

En la figura 36 se muestran los datos de medición del 30 de julio de 2019 en los que se puede observar el comportamiento de los modos de funcionamiento definidos. El gráfico muestra la presión del vapor, la temperatura del HTF a la salida del campo solar (Temperatura SF), la temperatura del HTF a la salida del sistema de almacenamiento durante la descarga (Temperatura TES) así como la irradiación solar directa (DNI).

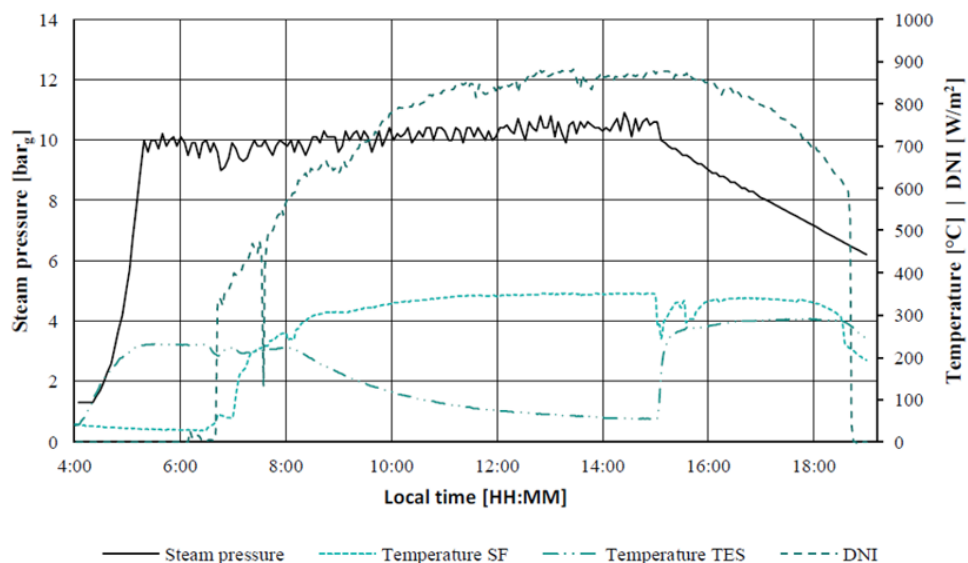
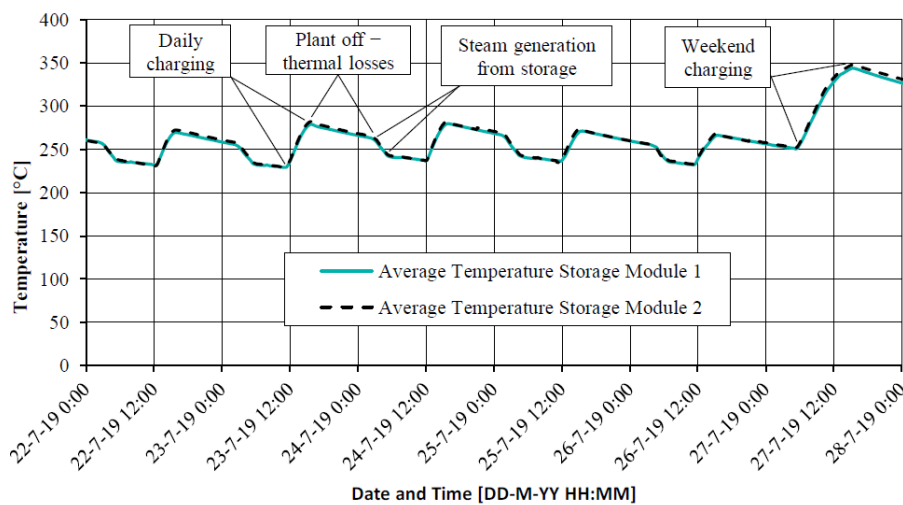


Figura 36. Resultados experimentales: temperatura HTF, DNI y la presión de vapor [25]

Como podemos observar en la figura 36 se da un suministro ininterrumpido de vapor desde las 5 de la mañana hasta las 3 de la tarde, tal y como requiere el consumidor.

Aproximadamente a las 4 de la mañana, se inicia la producción de vapor a partir de la descarga del sistema de almacenamiento. Hasta aproximadamente las 6 de la mañana, el vapor se produce únicamente a partir de la descarga del sistema de almacenamiento. De las 6 a las 7 de la mañana aproximadamente, se inicia un modo híbrido en el que la descarga del sistema de almacenamiento y el precalentamiento del campo solar se producen al mismo tiempo. A continuación, de las 7 a las 8 de la mañana, aproximadamente, se produce vapor mediante la combinación de los modos de descarga del C-TES y de generación de vapor, por lo que ambos funcionan a carga parcial. Aproximadamente a las 8 de la mañana, la descarga del sistema de almacenamiento se interrumpe y el vapor es producido únicamente por el campo solar. A las 15 horas, se inicia el modo de carga del sistema de almacenamiento hasta la puesta de sol. Cabe señalar que la brusca caída de la irradiación solar se debe a la sombra en los sensores de la estación meteorológica mientras el campo solar sigue recibiendo luz solar.

En la figura 37 se puede observar la temperatura media del módulo de almacenamiento durante un periodo de seis días.

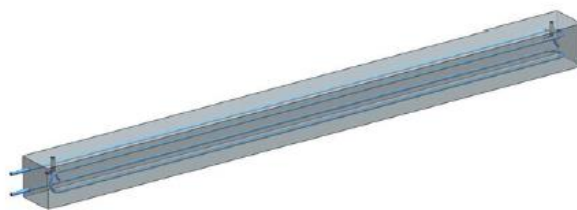


**Figura 37.** Temperatura media de los módulos de hormigón medida durante 6 días [25]

### 3.4 Sistema de almacenamiento que utiliza hormigón Cestari SRL e Italcementi.

#### 3.4.1 Principales características del proyecto

Se han encontrado en la literatura numerosas simulaciones que permitan realizar aplicaciones, en este caso se han ensayado los efectos de la composición del hormigón mediante el ensayo de dos mezclas diferentes de hormigón. En este caso se construyeron dos módulos de hormigón, utilizando mezclas de hormigón diferentes por dos fabricantes italianos: (Cestari SRL) y Italcementi Spa. Se utilizaron dos módulos que presentaban el mismo tamaño (3 m de largo, diámetro interior de 14 mm y diámetro exterior 16 mm) y la misma disposición de las tuberías; se utilizó acero inoxidable AISI 316. En la figura 38 se muestra la configuración del módulo de hormigón. El total de la longitud del tubo es de 12 m. Se eligió como fluido térmico un aceite mineral Paratherm™ NF



**Figura 38.** Configuración del módulo de hormigón [6]

En la tabla 14 se muestran las propiedades de los hormigones que se utilizaron para llevar a cabo el experimento.

Cabe destacar que cada módulo de hormigón se trata de un paralelepípedo de sección cuadrada 0,2x0,2 m con un peso total de 290 kg. Los módulos de hormigón están cubiertos por dos capas aislantes una es de cerámica y la otra de Rockwool™, el objetivo de cubrir el hormigón por estas capas aislantes es que esto permite reducir las pérdidas de calor por convección. En la tabla 15 se recogen las propiedades del fluido térmico utilizado.

Propiedades	Hormigón Cestari SRL	Hormigón Italcementi Spa
<b>Cp (J/kg K)</b>	820	930
<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2,483	1,837
<b>Conductividad térmica (W/m K)</b>	2,21	1,80
<b>Difusividad térmica (m<sup>2</sup>/s)</b>	1,123·10 <sup>-6</sup>	1,054·10 <sup>-6</sup>
<b>Número de biot</b>	123	152

**Tabla 14.** Propiedades de las dos mezclas de hormigón utilizadas para esta aplicación. [6]

Propiedades	Ecuaciones
<b>Cp (J/kg K)</b>	$c=5,284 \cdot t+1720$
<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	$\rho=-0,651 \cdot t+895,6$
<b>Conductividad térmica (W/m K)</b>	$\lambda=-8 \cdot 10^{-5} \cdot t+0,11$
<b>Viscosidad dinámica(kg/s·m)</b>	$(53238 \cdot t^{-2,138})/1000$
<b>Máxima temperatura de operación</b>	332º C

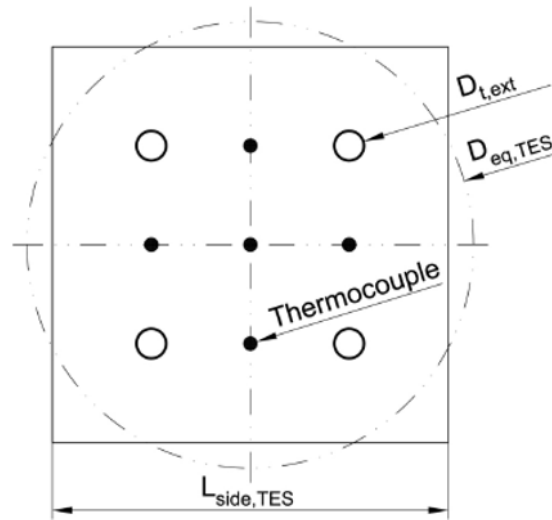
**Tabla 15.** Tabla de propiedades del fluido térmico, aceite Paratherm NF. [6]

En la tabla 16 se muestran algunos parámetros principales del sistema de almacenamiento.

Parámetros	Valor
<b>Longitud del sistema de almacenamiento</b>	3 m
<b>Longitud lateral del TES</b>	0,2 m
<b>Diámetro equivalente del TES</b>	0,226 m
<b>Longitud total del tubo</b>	12 m
<b>Diámetro interior del tubo</b>	0,014 m
<b>Diámetro exterior del tubo</b>	0,016 m
<b>Conductividad térmica del tubo</b>	16 (W/m K)
<b>Espesor de la capa aislante 1</b>	0,1 m
<b>Espesor de la capa aislante 2</b>	0,1 m
<b>Conductividad térmica capa aislante 1</b>	0,06 (W/m K)
<b>Conductividad térmica capa aislante 2</b>	0,035 (W/m K)
<b>Densidad del material aislante</b>	80 kg/m <sup>3</sup>
<b>Cp. del material aislante</b>	1030 (J/kg K)

**Tabla 16.** Parámetros principales del TES para esta aplicación. [6]

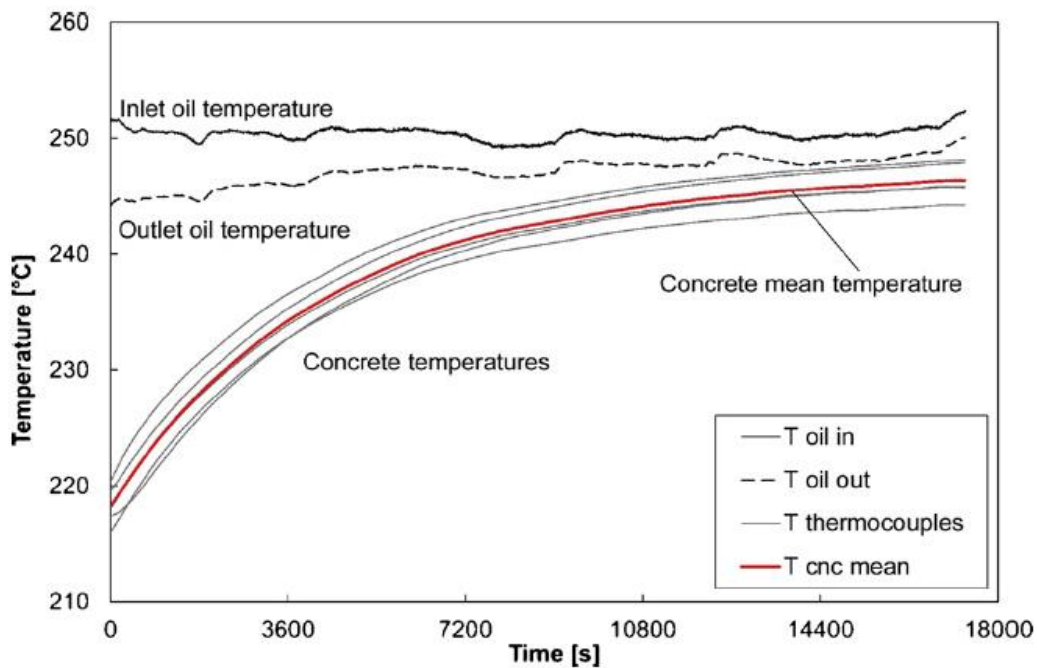
El módulo de hormigón fue instrumentado con termopares que se instalaron durante la fabricación, se instalaron 5 en la sección central del hormigón. 9 a lo largo de la superficie exterior del módulo y 4 sobre la superficie exterior del tubo. Estos se pueden ver en la figura 39.



**Figura 39.** Posición de los termopares en el módulo de hormigón. [6]

### 3.4.2 Resultados experimentales de los ensayos

La tasa del caudal másico de aceite se fijó alrededor de 0,13 y 0,15 kg/s lo que asegura el desarrollo de un flujo turbulento en el tubo. La temperatura de entrada del aceite térmico debería haberse mantenido constante (comportamiento ideal). Esto se muestra en la figura 40, en la que se puede observar la evolución de la temperatura media del módulo de hormigón (suministrado por Cestari SRL), la temperatura del fluido térmico a la entrada y la temperatura del fluido térmico a la salida, en un proceso de carga al sistema. La temperatura del aceite en la entrada se mantiene en  $250.4 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$



**Figura 40.** Evolución de la temperatura media del hormigón y del HTF. [6]

Es por esto que la temperatura media del módulo de hormigón es el parámetro principal que describe el

comportamiento térmico del sistema. Como se puede observar en la figura 40, la temperatura del hormigón no tiene fluctuaciones, como las que podemos observar en el aceite térmico, esto se debe a la capacidad térmica del sistema de almacenamiento.

En la tabla 17 se muestran los principales resultados de los ensayos para la carga y descarga.

Main parameters for experimental tests and results.

Experimental parameters							Calculated parameters			
Cnc.	Test	$T_{carga}$ [°C]	$T_{descarga}$ [°C]	$T_{env}$ [°C]	$\dot{m}_{oil}$ [kg s <sup>-1</sup> ]	Time [s]	$Q_{cnc}$ [MJ]	$\varepsilon$ [%]	$\varepsilon_{mod}$ [%]	Dev [%]
A	1 Charge	239.8	280.9	34.0	0.145	13,760	8.73	88.7%	94.8%	+4.08%
	1 Disch.	274.3	250.6	34.0	0.145	10,625	6.75	105.3%	96.1%	+4.15%
A	2 Charge	218.3	250.4	32.5	0.131	17,330	6.33	87.8%	94.7%	+0.91%
	2 Disch.	245.6	219.6	32.5	0.131	8,254	6.75	96.9%	90.0%	+7.60%
B	1 Charge	213.3	249.7	30.3	0.131	14,237	5.98	86.5%	93.9%	-2.49%
	1 Disch.	245.4	220.9	31.4	0.131	7,630	6.03	96.7%	88.0%	-3.07%
B	2 Charge	241.3	279.7	31.3	0.145	16,391	4.76	87.5%	95.5%	-2.29%
	2 Disch.	276.3	249.7	32.4	0.145	6,786	5.03	94.2%	85.1%	-2.05%

**Tabla 17.** Resultados experimentales de los parámetros principales. [6]



# 4 MODELO MATEMÁTICO

## 4.1 Introducción

En este apartado se va a explicar el modelo térmico de un sistema de almacenamiento de energía térmica en hormigón mediante una metodología de cálculo descrita a continuación e implementada gracias al programa EES (Engineering Equation Solver), que permite llevar a cabo distintas simulaciones gracias a las cuales se pueden realizar evaluaciones generales sobre los principales parámetros que intervienen en el diseño del sistema.

Existe una amplia variedad de modelos utilizados para los sistemas de almacenamiento de energía térmica en calor sensible en la literatura, podemos observar que los modelos se subdividen en tres categorías principales:

- ❖ Modelos analíticos.
- ❖ Modelos de elementos finitos (FEM): Simulaciones muy precisas y rígidas, que sin embargo no pueden ser fácilmente extendidas a diferentes casos o geometrías, y el tiempo de cálculo es extenso. No se utiliza para simulaciones rápidas.
- ❖ Modelos simplificados: En algunos casos dependiendo de los requisitos un modelo simplificado podría ser la solución más adecuada, se trata de simulaciones simples y rápidas que permiten obtener algunos parámetros de diseño. En estos casos se necesitan constantes semi empíricas o parámetros de entrada derivados de simulaciones del modelo de elementos finitos.

El modelo que se presenta a continuación es un modelo matemático simplificado que utiliza correlaciones derivadas de otros modelos que entrarían en la segunda categoría. Aunque esta clasificación es discutible, ya que algunos modelos analíticos, también pueden considerarse como modelos simplificados.

Por otra parte, es necesario tener en cuenta que ningún modelo considera la presencia de capas aislantes en la superficie exterior del sistema de almacenamiento térmico.

## 4.2 Aplicaciones del modelo matemático y parámetros de entrada

El modelo matemático propuesto, se trata de un modelo simplificado que se utiliza para un sistema de almacenamiento de energía en calor sensible, se trata de un sistema pasivo (en medio sólido) el cual tiene una respuesta fluctuante.

Este modelo es adecuado para utilizarse como una herramienta de prediseño de sistemas de almacenamiento de energía o como un componente independiente que puede ser integrado en otros modelos o programas de simulación ante respuestas transitorias en sistemas de producción de potencia.

Los resultados transitorios de interés en los sistemas de almacenamiento de energía como son la temperatura media del hormigón o la cantidad de calor intercambiado entre el fluido térmico y el hormigón, la energía almacenada o liberada por/desde el bloque de hormigón o la temperatura de salida del fluido térmico, se presentan a través de un simple y fácil uso de expresiones matemáticas.

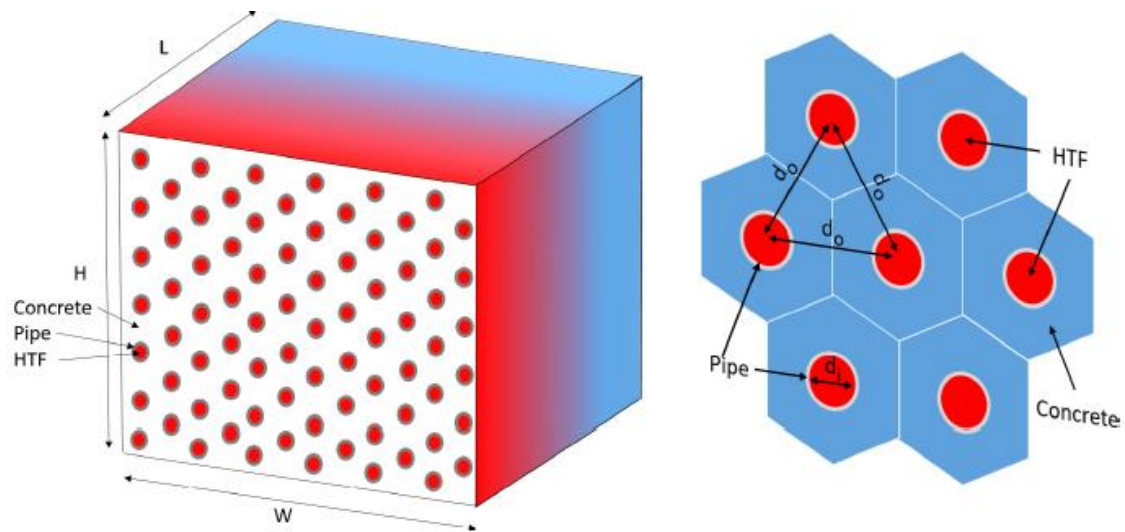
Los parámetros de entrada al modelo son:

- Diámetro interno:  $d_i$
- Distancia de centro a centro entre los tubos:  $d_o$
- Velocidad del fluido térmico, suministrado por el campo solar:  $V_{HTF}$
- Temperatura inicial del sistema de almacenamiento de energía:  $T_{ini}$
- Temperatura del fluido térmico a la entrada:  $T_{inf}$ .
- Las dimensiones del módulo de hormigón que rodea a un solo tubo:  $V_h$
- El número de tubos:  $N_{tubos}$
- La resistencia al contacto entre la interfaz tubería-hormigón:  $R_{tub-h}$

### 4.3 Descripción de la transferencia de calor en el módulo de hormigón

En la figura 41 se presenta la disposición de un módulo de hormigón utilizado para como sistema de almacenamiento, se trata de un paralelepípedo de dimensiones  $W \times H \times L$ . El sistema de almacenamiento de energía térmica (TES) utiliza como fluido térmico aceite sintético, para transferir calor mientras el fluido fluye a través de un intercambiador de calor tubular (acero inoxidable 316) inmerso en la matriz de hormigón.

Los tubos que se utilizan son tubos rectos, estos tienen una disposición triangular equilátera de  $60^\circ$  para el intercambiador de calor tubular, siendo  $d_i$  el diámetro interno del tubo y midiendo la distancia de centro a centro entre las tuberías ( $d_o$ ). Esta configuración geométrica es más compacta que otras (por ejemplo, que la disposición rectangular) y en consecuencia se obtiene una mejor distribución de la temperatura en el hormigón.



**Figura 41.** Sistema de almacenamiento térmico en hormigón con tubos inmersos en la matriz. [28]

La capacidad total de almacenamiento, definida como la cantidad máxima de energía que el sistema de almacenamiento es capaz de almacenar, viene dada por la variación de la energía interna del sistema sólido:

$$Q_c^{stg} = \rho_c \cdot V_c \cdot (Cp_{c,Tinf} \cdot T_{inf} - Cp_{c,Tini} \cdot T_{ini})$$

donde  $\rho_c$ ,  $V_c$ ,  $Cp_c$ , son la densidad, el volumen y el calor específico del hormigón,  $T_{inf}$  es la temperatura del fluido de entrada y  $T_{ini}$  es la temperatura inicial del sólido. En los casos en que la variación de  $Cp_c$  es pequeña, (para un rango de temperatura en el sistema de almacenamiento de energía), se puede aproximar la capacidad total de almacenamiento como se indica en la siguiente ecuación:

$$Q_c^{stg} = M_c \cdot C_{p,avg} \cdot \Delta T$$

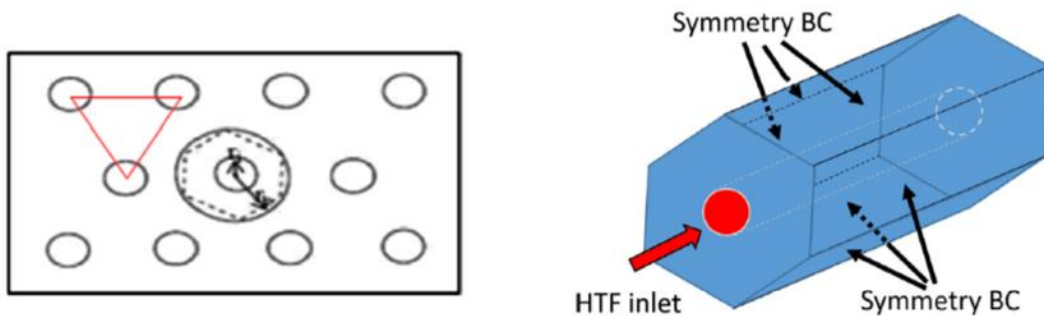
Donde  $C_{p,avg}$  es el calor específico promedio del hormigón en un rango de temperatura  $\Delta T$ .

Se puede considerar un modelo unidimensional ya que se asume que todos los tubos se comportan de la misma manera térmicamente (incluyendo los que están en las proximidades de los límites del módulo de almacenamiento de energía).

Teniendo en cuenta que habitualmente los sistemas de almacenamiento de energía tienen un gran tamaño y están altamente aislados, esta suposición no es crítica, ya que tienen las mismas condiciones geométricas y térmicas, y esto hace que la geometría se pueda simplificar a un solo tubo y al hormigón que lo rodea; se puede considerar como un hexágono ya que la distribución es triangular, tal y como se puede observar en la figura 42.

Así pues, la capacidad total de almacenamiento puede expresarse como el producto del número de tubos  $N_{tubos}$  y la capacidad de almacenamiento de un solo prisma hexagonal:

$$Q_c^{stg} = N_{tubos} \cdot Q_c$$



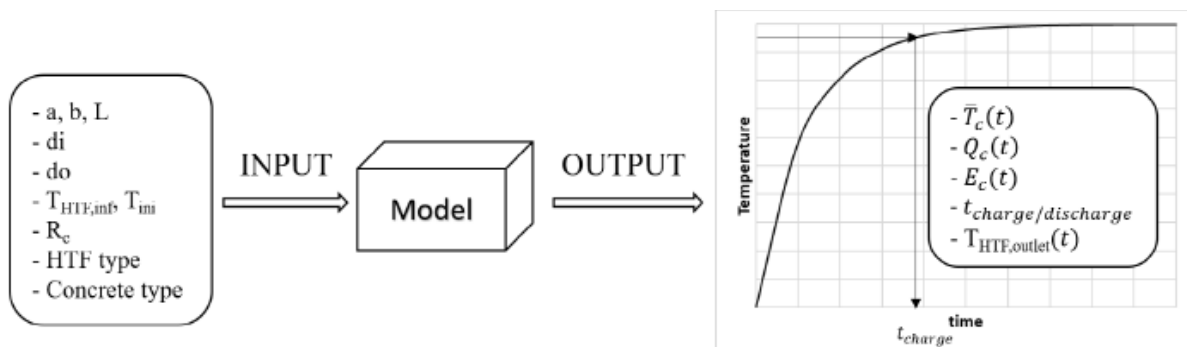
**Figura 42.** Simplificación al considerar un modelo unidimensional. [28] [10]

#### 4.4 Descripción del modelo matemático simplificado

Como ya se ha comentado en el apartado 4.1 existen diversos modelos que permiten realizar simulaciones en el diseño y prediseño de sistemas de almacenamiento de energía térmica, sin embargo, la integración de muchos de estos modelos en otros programas de simulación transitorios en centrales termosolares puede no ser práctica en muchas situaciones debido a la complejidad de las soluciones obtenidas o al limitado alcance de su aplicación.

Para superar este problema, en este documento se presenta un nuevo enfoque gracias a un modelo sencillo y simplificado que permite predecir el comportamiento térmico de sistemas de almacenamiento de energía térmica en hormigón de aplicación en centrales solares de colectores cilindro-parabólicos.

En la figura 43 se muestra como tras obtener unos parámetros de entrada (ciertas condiciones de diseño y algunos parámetros obtenidos de las simulaciones que se realicen previamente de la instalación solar) se utiliza modelo matemático que permite presentar los resultados transitorios de interés de los sistemas de almacenamiento de energía en un módulo de hormigón, como la temperatura media del hormigón, la cantidad de calor intercambiado entre el fluido térmico y el hormigón, la energía almacenada en el bloque de hormigón en un periodo de tiempo o la temperatura de salida del fluido de transferencia (HTF).



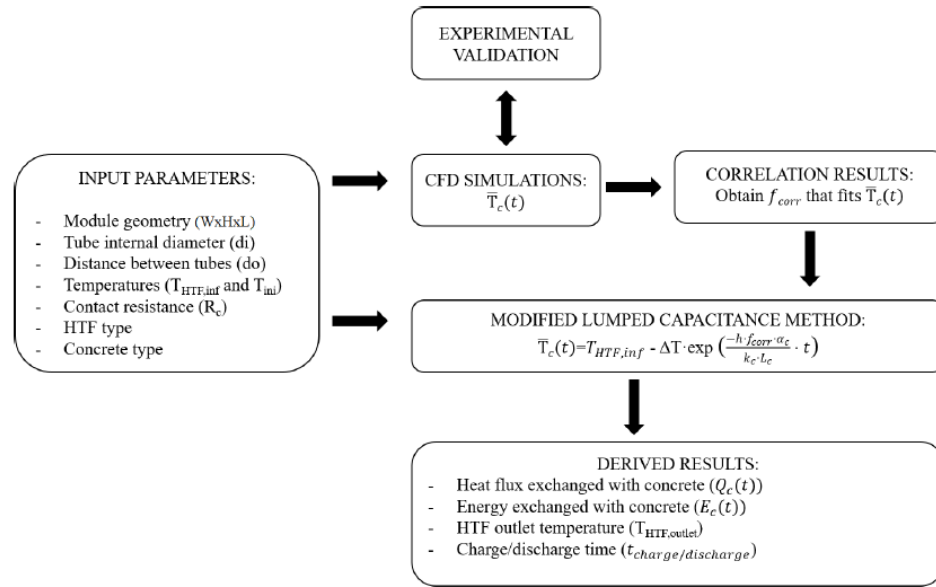
**Figura 43.** Parámetros de entrada y de salida del modelo simplificado. [28]

En cuanto al procedimiento que permite obtener las correlaciones utilizadas en el modelo simplificado este se describe en la figura 44. En primer lugar, se desarrolla un modelo para un sistema de almacenamiento de calor en sólido utilizando un método modificado de capacitancia en bloque que relaciona la temperatura media del hormigón en función del tiempo con los parámetros de entrada.

En segundo lugar, se establece un modelo numérico de CFD (Computational Fluid Dynamic) y se valida con una precisión satisfactoria con respecto a los datos experimentales para realizar un conjunto completo de simulaciones numéricas de CFD y de esta manera obtener un factor de corrección adecuado que depende de los parámetros de entrada del TES.

Finalmente, otras variables de interés como la cantidad de calor intercambiado o la temperatura de salida del

HTF se obtienen mediante la aplicación de las ecuaciones de conservación de masa y energía en el módulo de almacenamiento de energía.



**Figura 44.** Procedimiento que permite obtener las correlaciones utilizadas. [28]

Este modelo puede utilizarse como herramienta de prediseño y como componente independiente a ser implementado e integrado en otras herramientas de simulación, por ejemplo, TRNSYS. A continuación, se va a explicar la secuencia de cálculos del modelo simplificado.

#### 4.4.1 Cálculo del Re, Pr, y f

Calcular el número de Reynolds, el número de Prandtl definido de la siguiente manera y el factor de fricción correspondiente a la rugosidad de la pared (se asume que es una superficie lisa), a partir de las siguientes ecuaciones para los parámetros de entrada y las propiedades térmicas del fluido térmico, evaluadas en  $T_{HTF\_inf}$ .

$$Re = \frac{\rho_{HTF} \cdot V_{HTF} \cdot d_i}{\mu_{HTF}}$$

$$Pr = \frac{\mu_{HTF} \cdot C_{pHTF}}{k_{HTF}}$$

$$f = (0.79 \cdot \ln(Re) - 1.64)^{-2}$$

#### 4.4.2 Cálculo del Nusselt

Utilizando la correlación popular de flujo turbulento de Gnielinski.

$$Nu = \frac{\frac{f}{8} \cdot (Re - 1000) \cdot Pr}{1 + 12.7 \cdot \left(\frac{f}{8}\right)^{1/2} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} ; \quad 3000 < Re < 5,000,000 ; \quad 0,5 < Pr < 2000$$

#### 4.4.3 Cálculo del coeficiente de transferencia de calor convectivo h.

Calculamos el coeficiente de transferencia de calor convectivo a partir de la ecuación siguiente, en función del diámetro interno, el número de Nusselt y las propiedades térmicas del fluido térmico, evaluadas en  $T_{HTF\_inf}$ .

$$Nu = \frac{h \cdot d}{k_{HTF}}$$

#### 4.4.4 Cálculo de la longitud característica $L_c$ y de los parámetros adimensionales $\eta$ y $A_r$

$$L_c = \frac{V_{hormigón}}{A}$$

$$\eta = \frac{d_o}{d_i}; A_r = \frac{L}{L_c}$$

Siendo  $V_{hormigón}$ ; el volumen del módulo de hormigón que rodea al intercambiador de calor, y  $A$ ; área de la interfaz tubo-hormigón (área lateral del cilindro).

#### 4.4.5 Cálculo de los factores correctores.

$$f_{corr} = \frac{1}{(3.308 \cdot 10^{-5} \cdot \eta - 3.511 \cdot 10^{-5}) \cdot \left(100 \cdot \frac{L}{L_c} + Re\right) + 2}$$

Teniendo en cuenta la resistencia de contacto entre tubo y módulo de hormigón, se obtiene una fórmula cerrada para el factor de corrección global modificado.

$$f'_{corr} = \frac{1}{(3.308 \cdot 10^{-5} \cdot \eta - 3.511 \cdot 10^{-5}) \cdot \left(100 \cdot \frac{L}{L_c} + Re\right) + 2 + R_{tub-h} \cdot h}$$

#### 4.4.6 Evolución con el tiempo de la temperatura media en el módulo de hormigón.

$$\bar{T}_c(t) = T_{inf} - \Delta T \cdot \exp\left(\frac{-h \cdot f'_{corr}}{\rho_c \cdot Cp_c \cdot L_c} \cdot t\right)$$

Donde el efecto de la resistencia térmica de contacto  $R_{tub-h}$  en la interfaz tubería-hormigón se incluye a través del factor de corrección global modificado  $f'_{corr}$ .

#### 4.4.7 Evolución temporal del flujo de calor intercambiado.

A continuación, se muestra cómo calcular el flujo de calor intercambiado entre el fluido térmico y el bloque de hormigón.

$$Q(t) = \pi \cdot d_i \cdot L \cdot h \cdot f'_{corr} \cdot \Delta T \cdot \exp\left(\frac{-h \cdot f'_{corr}}{\rho_c \cdot Cp_c \cdot L_c} \cdot t\right)$$

#### 4.4.8 Energía absorbida o liberada en un periodo de tiempo

A continuación, se muestra la energía absorbida o liberada en un periodo de tiempo determinado por/desde el módulo de hormigón.

$$E(t) = \rho_c \cdot V_c \cdot Cp_c \cdot \Delta T \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-h \cdot f'_{corr}}{\rho_c \cdot Cp_c \cdot L_c} \cdot t\right)\right]$$

#### 4.4.9 Tiempo de carga $t_{stg}$ requerido para almacenar una cantidad de energía.

A partir de la ecuación anterior es sencillo obtener el tiempo de carga/descarga de almacenamiento  $t_{stg}$  requerido para almacenar/liberar una cantidad dada de energía  $E_{stg}$ .

$$t_{stg} = -\frac{\rho_c \cdot L_c \cdot Cp_c}{h \cdot f'_{corr}} \cdot \ln\left(1 - \frac{E_{stg}}{\rho_c \cdot V_c \cdot Cp_c \cdot \Delta T}\right)$$

#### 4.4.10 Obtener la evolución temporal de la temperatura de salida del HTF; $T_{HTF,out}$

$$T_{HTF,out} = \frac{-c_1 \pm \sqrt{c_1^2 - 4 \cdot c_2 \cdot \left( \frac{Q(t)}{q_{m,HTF}} - Cp_{HTFT_{HTF,out}} \cdot T_{HTF,inf} \right)}}{2 \cdot c_2}$$

Siendo  $c_1$  y  $c_2$ :

$$Cp_{HTF} = c_1 + c_2 \cdot T$$

Ya que el calor específico del fluido térmico (HTF) suele tener una dependencia lineal conocida con la temperatura.

#### 4.5 Implementación del modelo matemático y verificación de los resultados.

En el presente apartado se implementa el modelo matemático descrito, en el programa EES (Engineering Equation Solver) y se verifican los resultados, para ello se ha tenido en cuenta los parámetros de entrada que se indican en el artículo 28, de esta manera se pueden obtener unos resultados comparables con los del mismo.

La velocidad del fluido térmico se calcula a partir del caudal volumétrico, que como se indica en el artículo es  $20 \text{ m}^3/\text{h}$ , este caudal volumétrico se refiere a todo el sistema, como se trata de un modelo con 132 tubos. Se calcula la velocidad de entrada del fluido térmico a partir de la siguiente expresión:

$$V_{htf} \left( \frac{m}{s} \right) = \frac{q_{v,htf}}{N_{tubos}} \left( \frac{m^3}{h} \right) \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \cdot \frac{1}{A_{tubo} (m^2)}$$

Siendo el área del tubo:

$$A_{tubo}(m^2) = \frac{\pi \cdot d_i^2}{4}$$

La temperatura inicial del hormigón en el proceso de carga se supone  $264 \text{ }^\circ\text{C}$  y la temperatura inicial del fluido térmico  $364^\circ\text{C}$ ; ya que se considera un sistema de almacenamiento térmico para canales cilindro parabólicos y estos tienen ciertas limitaciones entre ellas la temperatura máxima del fluido térmico aproximadamente de  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ , por este motivo se toma tomamos  $364 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Otro dato de entrada es el volumen de hormigón que rodea al tubo,  $V_h$ . Para entender el cálculo de volúmenes se muestra la figura 45, este se calcula de la siguiente manera:

$$V_h = V_{prisma \text{ hexagonal}} - V_{cilindro}$$

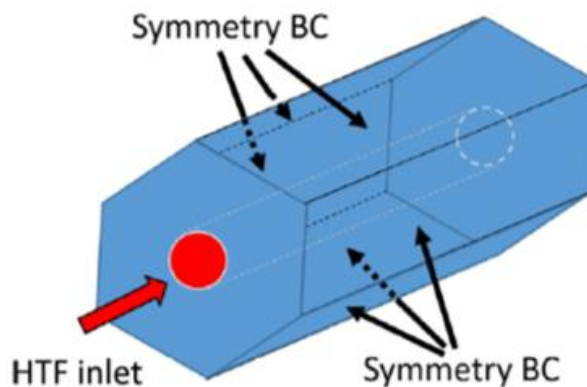


Figura 45. Cálculo de volúmenes. [28]

Sabiendo que el volumen del prisma hexagonal se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$V_{prisma\ hexagonal} (m^3) = 3 \cdot lado \cdot ap \cdot L$$

Siendo L, la longitud del bloque de hormigón que se supone 8,34 m y siendo *ap* la apotema, que puede calcularse como la mitad de la distancia de centro a centro entre los tubos. Por otra parte, se conoce que el lado se relaciona con la apotema mediante el teorema de Pitágoras (ya que el prisma es un hexágono regular); por lo tanto, se puede calcular el volumen del prisma hexagonal a partir de la siguiente ecuación:

$$V_{prisma\ hexagonal}(m^3) = \frac{3 \cdot d_o^2 \cdot L}{2 \cdot \sqrt{3}}$$

El volumen del cilindro se calcula mediante la siguiente expresión:

$$V_{cilindro}(m^3) = \frac{\pi \cdot d_{ext}^2 \cdot L}{4}$$

Siendo  $d_{ext}$ , el diámetro exterior del tubo recto.

Por otra parte, es necesario calcular el área de la interfaz tubo-hormigón; es decir el área lateral del cilindro, este se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$A (m^2) = \pi \cdot d_{ext} \cdot L$$

Como ya se ha explicado con anterioridad es necesario modelar entre el tubo y el hormigón una resistencia de contacto adicional, ya que entre hormigón y el tubo inmerso en él, existe un hueco de aire cuya conductividad térmica es muy baja, que permite que se cree una resistencia de contacto. Esta se supone de un valor de 0,0025  $m^2K/W$ , tal y como viene indicado en el artículo de la referencia número 28.

Se pueden utilizar varios fluidos térmicos; en el artículo referenciado 28, se muestran las propiedades de algunos de ellos. Para realizar la verificación del modelo implementado se han tomado los datos del fluido térmico Sylherm 800.

Por otra parte, el caudal másico del fluido térmico se calcula de la siguiente manera:

$$q_{m,HTF} \left( \frac{kg}{s} \right) = A_{tubo} \cdot V_{htf} \cdot \rho_{htf}$$

Al haber utilizado el programa EES, se pueden emplear también las propiedades calculadas por este programa, sin embargo, se ha decidido utilizar aquellas dadas por el artículo, para intentar obtener los resultados de la manera más precisa posible.

En cuanto al medio de almacenamiento, se ha elegido un hormigón de alta temperatura, cuyas propiedades aparecen en el artículo referenciado [28].

En la figura 46 se muestra un cuadro resumen de los datos de entrada que se han tomado, y que se han calculado gracias al programa EES mediante, las ecuaciones que se han explicado con anterioridad.

Siguiendo los pasos mostrados en el apartado 4.4. Se han realizado varias simulaciones en el programa EES (Engineering Equation Solver).

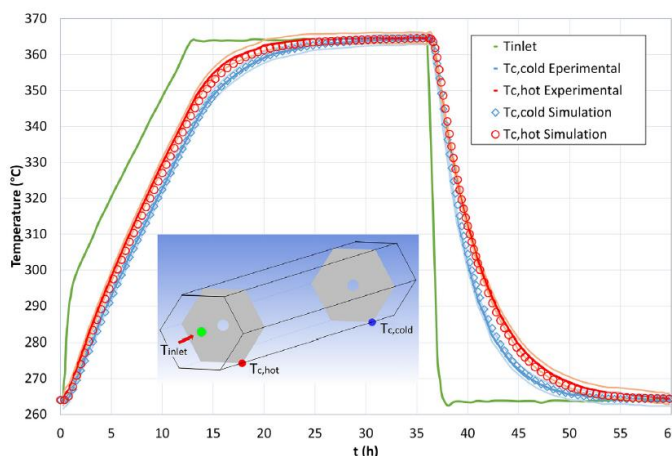
Además de los datos mostrados en el cuadro resumen de los parámetros de entrada, se necesita introducir una temperatura inicial a la que se encuentra el hormigón y la temperatura inicial a la que se encuentra el fluido de transferencia térmica. Para un proceso de carga, suponiendo la temperatura de entrada del fluido térmico constante,  $T_{inf}$ , sabiendo que el hormigón se encuentra a una temperatura inicial  $T_{ini}$ , se puede obtener gracias al programa EES la evolución de la temperatura media del hormigón con el tiempo, el calor intercambiado entre el fluido térmico y el hormigón y la energía almacenada en un periodo de tiempo; para ello se han utilizado tablas paramétricas que permiten obtener estos valores en función del tiempo.

Sin embargo, como se observan en los resultados mostrados en la figura 47, se puede observar que la temperatura de entrada del fluido HTF no es constante en ciertos periodos de tiempo, esta varía durante la carga al sistema en un periodo de tiempo de 12 horas, después se mantiene constante durante 24 horas. Durante la descarga al sistema, la temperatura del fluido de transferencia térmica se podría considerar prácticamente constante (lo es durante todo el proceso de descarga salvo desde la hora 36 a la hora 37).

## DATOS DE ENTRADA

<p style="text-align: center;"><b>Propiedades del hormigón de alta temperatura utilizado (400° C) :</b></p> <p style="text-align: center;"><math>\rho</math> (kg/ m<sup>3</sup>) =2250</p> <p style="text-align: center;"><math>C_p</math> (J/kg K)= 0,875 · T+700</p>	<p style="text-align: center;"><b>Propiedades fluido térmico Syltherm 800:</b></p> <p style="text-align: center;"><math>\rho</math> (kg/ m<sup>3</sup>) = 6,023 · 10<sup>-4</sup> · T<sup>2</sup> - 7,945 · 10<sup>-2</sup> · T + 9,587 · 10<sup>2</sup></p> <p style="text-align: center;"><math>C_p</math> (J/kg K)= 1,7 · T -1575</p> <p style="text-align: center;"><math>\mu</math> (Pa · s) = 1,416 · 10<sup>-2</sup> · T<sup>4</sup> - 1,659 · 10<sup>-9</sup> · T<sup>3</sup> + 7,178 · 10<sup>-7</sup> · T<sup>2</sup> - 1,405 · 10<sup>-4</sup> · T + 1,142 · 10<sup>-2</sup></p> <p style="text-align: center;"><math>K</math> (W/m K) = -1,905 · 10<sup>-4</sup> · T + 0,14</p>	<p style="text-align: center;"><b>Datos geométricos del módulo de hormigón:</b></p> <p style="text-align: center;"><math>d_i</math> =0,015 m</p> <p style="text-align: center;"><math>d_{ext}</math> =0,018 m</p> <p style="text-align: center;"><math>d_o</math> =0,134 m</p> <p style="text-align: center;"><math>L</math> = 8,37 m</p> <p style="text-align: center;"><math>h</math> =1,3 m</p> <p style="text-align: center;"><math>w</math> =1,7 m</p> <p style="text-align: center;"><math>V_{hormigón}</math> =0,128 m<sup>3</sup></p>
<p style="text-align: center;"><b>Datos del fluido térmico utilizado y de los intercambiadores</b></p> <p style="text-align: center;"><math>q_{v,htf}</math> =20 m<sup>3</sup> /h (total)</p> <p style="text-align: center;"><math>N_{tubos}</math> =132</p> <p style="text-align: center;"><math>A_{tubo}</math> =0,0001767 m<sup>2</sup></p> <p style="text-align: center;"><math>V_{htf}</math> =0,238 m/s</p> <p style="text-align: center;"><math>A</math> =0,4733 m<sup>2</sup> (interfaz tubo-hormigón)</p> <p style="text-align: center;"><math>q_{m,HTF}</math> =0,02482 kg/s (por tubo)</p>		

**Figura 46.** Cuadro resumen de los parámetros de entrada.



**Figura 47.** Temperatura del hormigón en ensayos y en simulaciones de CFD. [28]

Para obtener la curva de la variación de la temperatura media del hormigón en un proceso de carga y descarga se ha realizado de la siguiente manera:

- ❖ **Temperatura de entrada del fluido térmico variable (0h-12h) durante el proceso de carga:** Para este caso se han llevado a cabo 12 simulaciones, ya que se ha discretizado la curva, se ha aproximado línea recta por 12 escalones, tal y como se puede observar en la figura 48, de esta manera se consideraría una temperatura de entrada del fluido térmico constante para pequeños intervalos de tiempo (1 hora). De este modo el resultado de la simulación que permite obtener la temperatura media del hormigón en el instante t=1 h, y este sería el punto de partida de la siguiente simulación (t=2h).

Es decir, en la primera simulación se ha marcado una temperatura de entrada del fluido térmico de 280 °C en (t=0,1 h) y una temperatura de inicial del hormigón  $T_{ini}$  =264 °C, utilizando el código EES que se muestra en el Anexo 2, para una hora después se obtiene una temperatura media del hormigón de 268, 4° C. A continuación se realiza otra simulación en la cual la temperatura inicial del hormigón es de  $T_{ini}$  =268, 4° C y la temperatura  $T_{inf}$  (temperatura de entrada del fluido térmico, medida en la gráfica anterior es) 300 °C, de esta manera para un tiempo=3600 s, se obtiene una nueva temperatura media del hormigón al cabo de dos horas, que se supone la temperatura inicial del hormigón para la siguiente simulación, y la temperatura del fluido térmico se va tomando de la gráfica como ya se ha explicado.



De esta manera se recoge en la tabla 19: la temperatura media del hormigón obtenida gracias al EES, la temperatura media del hormigón obtenida gracias a los datos experimentales y la temperatura del fluido térmico, para cada hora.

En este caso el número de Reynolds, Prandtl y el número de Nusselt van a variar ya que estos dependen de las propiedades del fluido térmico a una determinada temperatura, por lo tanto, el coeficiente de transferencia de calor convectivo también varía, al igual que los factores correctores.

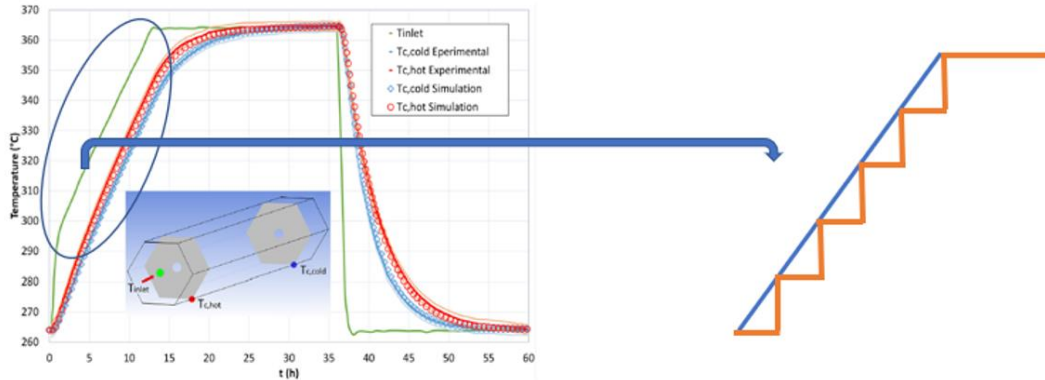


Figura 48. Discretización de la temperatura del fluido térmico.

Tiempo		Temperatura		Otros parámetros obtenidos del EES					
Horas	T_media_h EES (° C)	T_media_h experimental (° C)	T_HTF (° C)	Re	Pr	Nu	h	fcorr	fcorr'
0,1	264	264	280	3816	15,27	39,34	227,3	0,2632	0,229
1	268,4	268	290	4033	14,65	41,34	233,6	0,2593	0,2252
2	274,4	273	300	4301	13,92	43,68	241,3	0,2547	0,2208
3	281,5	282	308	4564	13,27	45,86	248,7	0,2504	0,2166
4	288,9	289	313	4755	12,82	47,39	253,9	0,2473	0,2137
5	295,4	296	320	5066	12,15	49,76	262,2	0,2424	0,2092
6	303,8	304	325	5322	11,65	51,64	268,8	0,2386	0,2056
7	311,4	309	330	5614	11,12	53,68	276,1	0,2343	0,2017
8	317,5	316,5	337	6090	10,35	56,86	287,4	0,2277	0,1957
9	323,5	321,5	343	6571	9,669	59,90	298,1	0,2214	0,19
10	330,5	328	350	7235	8,867	63,82	312,0	0,2132	0,1828
11	334,5	333	357,5	8085	8,017	68,47	328,2	0,2036	0,1745
12	337	337	364	8947	7,31	72,83	343,1	0,1947	0,1669

Tabla 18. Temperatura del hormigón, para una temperatura del HTF variable.

- ❖ **Temperatura de entrada del fluido térmico constante (12h – 36h) durante el proceso de carga:** Se lleva a cabo una sola simulación con el programa EES en la que se toma como temperatura inicial del hormigón 237 °C (medidos de la figura 46 u obtenidos de la anterior simulación). La temperatura de entrada del fluido térmico es de 364 °C. Se crea una tabla paramétrica que permite obtener la evolución de la temperatura media del hormigón con el tiempo, estos resultados se comparan con los resultados experimentales recogidos en el artículo 28 (véanse las referencias). La tabla 19 muestra la evolución de la temperatura media del hormigón en función del tiempo para una temperatura del fluido térmico constante comparada con los datos experimentales. Al ser constante la temperatura del fluido térmico durante este periodo de tiempo, se obtienen los siguientes resultados del número de Reynolds, Prandtl, y Nusselt, el coeficiente de transferencia de calor convectivo y los factores correctores, estos valores se muestran en la figura 49.

Tiempo		Temperatura	
Horas	T media del hormigón EES (° C)	T media hormigón datos experimentales (° C)	
12	337	337	
14	344,6	345	
16	356,9	355	
18	360,3	359	
20	362,1	361	
22	363	362,5	
24	363,5	363	
26	363,7	363,5	
28	363,9	363,7	
29	364	364	
32	364	364	
35	364	364	
36	364	364	

**Tabla 19.** Temperatura media del hormigón para una temperatura del HTF constante

**Re=8947**  
**Pr=7,31**  
**Nu=72,83**  
**h= 343,1**  
**fcorr=0,1947**  
**Fcorr'=0,1669**

**Figura 49.** Número de Reynolds, Prandtl, Nusselt, h y factores correctores

- ❖ **Temperatura en entrada del fluido térmico constante durante el proceso de descarga (38h- 57h):** Aunque existen variaciones en la temperatura de entrada del fluido térmico durante la descarga durante un periodo de tiempo muy breve (desde la hora 36 hasta la 37), por este motivo se lleva a cabo una sola simulación con el programa EES. En la que se toma como temperatura inicial del hormigón 340 °C (medidos en la gráfica), y la temperatura de entrada constante del fluido térmico es de 264° C, se crea una tabla paramétrica que permite obtener la evolución de la temperatura media del hormigón con el tiempo, estos datos se comparan con los datos experimentales. La tabla 20 recoge estos resultados. Al ser constante la temperatura del fluido térmico durante este periodo de tiempo, se obtienen los resultados del número de Reynolds, Prandtl, y Nusselt, el coeficiente de transferencia de calor convectivo y los factores correctores, que se muestran en la figura 50.

**Re=6321**  
**Pr=10,01**  
**Nu=58,34**  
**h= 292,6**  
**fcorr=0,2246**  
**Fcorr'=0,1929**

**Figura 50.** Número de Nusselt, Reynolds, Prandtl, h y factores correctores.

Tiempo		Temperatura	
Horas	T media del hormigón EES (° C)	T media hormigón datos experimentales (° C)	
36	364	364	
37	Temperatura HTF variable	354	
38	340	340	
39	318,9	318	
40	305,5	307	
41	295,6	300	
42	284,6	288	
43	278,9	282	
44	274,8	276	
45	271,8	273	
46	269,6	271	
47	268	270	
48	266,9	268	
49	266,1	267	
50	265,5	266	
52	264,8	265	
55	264,3	264,2	
57	264,2	264	

**Tabla 20.** Temperatura media del hormigón en función del tiempo para un proceso de descarga.

En la figura 51, se muestra de manera gráfica la evolución de la temperatura media del hormigón en un proceso de carga y descarga. En naranja se observan los resultados obtenidos gracias al modelo matemático simplificado implementado en EES, y en azul se muestran los resultados experimentales que se obtienen de la gráfica 8 del artículo 28 que se referencia (de la figura 48 de este trabajo final de máster). Esto nos permite demostrar que el modelo matemático simplificado arroja resultados muy precisos para temperaturas medias gracias a simulaciones sencillas y rápidas. Por lo tanto, queda demostrado que las simulaciones obtenidas gracias al modelo matemático son precisas y fiables. Por este motivo, en el apartado que se presenta a continuación se realiza un análisis paramétrico, gracias al cual se obtienen ciertos criterios de diseño, los cuales resultan de interés a la hora de realizar un prediseño de un sistema de almacenamiento térmico en hormigón.

En cuanto a la capacidad de almacenamiento total esta se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$Q_c^{stg} = M_c \cdot C_{p,avg} \cdot \Delta T$$

- ❖ Siendo  $M_c$ , la masa del hormigón.
- ❖ Siendo  $C_{p,avg}$ , el calor específico medio en un rango de temperaturas  $\Delta T$ .

La masa del hormigón se desconoce, sin embargo, se puede obtener de forma sencilla:

$$M_c = \rho_c \cdot V_{c,total}$$

- ❖ Siendo  $\rho_c$ , la densidad del hormigón utilizado.
- ❖ Siendo  $V_{c,total} = (1,7 \cdot 1,3 \cdot 8,37) \cdot N_{tubos} \cdot V_{cilindro} \text{ m}^3$ . Este se puede aproximar al volumen calculado para el hormigón que rodea un solo tubo multiplicado por el número de tubos.

Se obtiene una masa de hormigón de 40 toneladas aproximadamente, y una capacidad de almacenamiento aproximadamente de 1055 kWh, es decir de 1,055 MWh.

## EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA MEDIA DEL HORMIGÓN EN UN PROCESO DE CARGA Y DESCARGA

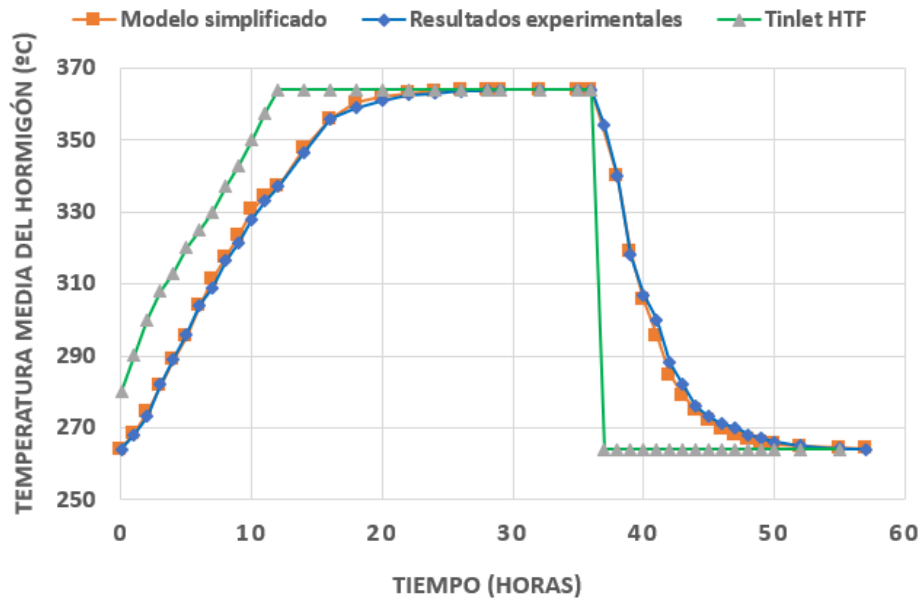


Figura 51. Evolución de la temperatura media del hormigón.

# 5 RESULTADOS

## 5.1 Introducción

En este apartado se va a presentar un prediseño de un sistema de almacenamiento térmico en hormigón para el cual se va a utilizar el modelo matemático simplificado presentado en el apartado anterior, y se va a realizar un análisis paramétrico de aquellas variables que resultan de interés.

En primer lugar, se define un caso base a partir del cual se realiza un análisis paramétrico; en segundo lugar, a partir del análisis paramétrico se obtienen ciertos criterios de diseño, estos resultan de interés a la hora de realizar un prediseño de un sistema de almacenamiento de energía térmica en hormigón. Finalmente se realiza un caso práctico en el cual se dan ciertas especificaciones de diseño (la capacidad de almacenamiento y el tiempo de carga del sistema), a partir de estas se obtiene un sistema compatible con dichas especificaciones.

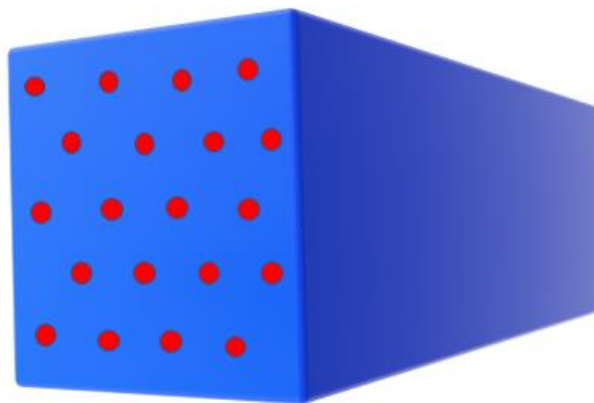
## 5.2 Análisis paramétrico

### 5.2.1 Caso base

Para definir un caso base de un sistema de almacenamiento térmico, basándonos en las aplicaciones estudiadas en la literatura, y en el modelo matemático simplificado; suponemos que se desea obtener un prediseño de un sistema térmico de almacenamiento en hormigón que se va a instalar en una fábrica de refrescos, para la generación de vapor de la misma.

Para ello se va a necesitar un sistema de almacenamiento pequeño, que sea posible enviarlo en contenedores y va a utilizar un aceite térmico sintético por ejemplo Syltherm 800.

Para tomar un diseño base, se puede suponer que el sistema de almacenamiento térmico va a constar de 4 submódulos de hormigón como el que se presenta en la figura 52, con 20 tubos embebidos en él, formando una matriz de 4x5. Suponemos inicialmente una longitud de los submódulos de 5 m. Las dimensiones del módulo de hormigón son de  $0,44 \times 0,44 \times 5 \text{ m}^3$ .



**Figura 52.** Módulo de hormigón elegido para comenzar el análisis paramétrico.

Se transportan en 2 contenedores, y estos cuatro módulos se ponen de dos en dos en serie (se puede simular como dos módulos de 10 m y 20 tubos). Y estos dos módulos de 10 m y 20 tubos cada uno se ponen en paralelo, resultando finalmente un sistema equivalente de 40 tubos y 10 metros de longitud. La disposición del sistema equivalente visto desde la planta se puede observar en la figura 53.

Como se ha explicado en el apartado 4, hay que tener en cuenta que el programa EES y el modelo matemático simplificado calcula la temperatura media del hormigón en un proceso de carga y descarga, el calor intercambiado, y la energía almacenada o liberada en/desde un módulo de hormigón (prisma hexagonal) de un solo tubo.



**Figura 53.** Disposición del sistema equivalente.

En la figura 54 se presenta un cuadro resumen de los datos de entrada al modelo matemático que se conocen y que se han supuesto para realizar una primera aproximación inicial del comportamiento térmico del sistema equivalente.

#### DATOS DE ENTRADA

<p><b>Propiedades del hormigón de alta temperatura utilizado (400° C):</b></p> <p><math>\rho</math> (kg/ m<sup>3</sup>) = 2250</p> <p><math>C_p</math> (J/kg K) = 0,875 · T - 700</p>	<p><b>Propiedades fluido térmico Syltherm 800:</b></p> <p><math>\rho</math> (kg/ m<sup>3</sup>) = 6,023 · 10<sup>-4</sup> · T<sup>2</sup> - 7,945 · 10<sup>-2</sup> · T + 9,587 · 10<sup>2</sup></p> <p><math>C_p</math> (J/kg K) = 1,7 · T - 1575</p> <p><math>\mu</math> (Pa · s) = 1,416 · 10<sup>-2</sup> · T<sup>4</sup> - 1,659 · 10<sup>-9</sup> · T<sup>3</sup> + 7,178 · 10<sup>-7</sup> · T<sup>2</sup> - 1,405 · 10<sup>-4</sup> · T + 1,142 · 10<sup>-2</sup></p> <p><math>K</math> (W/m K) = -1,905 · 10<sup>-4</sup> · T + 0,14</p>
<p><b>Datos del diseño base:</b></p> <p><math>d_i</math> = 0,0216 m</p> <p><math>d_{ext}</math> = 0,0269 m</p> <p><math>d_o</math> = 0,11 m</p> <p><math>L</math> = 10 m</p> <p><math>N_{tubos}</math> = 40</p> <p><math>V_{HTF}</math> = 0,2575 m/s</p> <p><math>R_{tub-h}</math> = 0,0025 m<sup>2</sup>K/W</p>	

**Figura 54.** Datos de entrada que se han supuesto para el establecer un caso base.

Suponemos que el fluido de transferencia térmica entra a una temperatura constante de 314 °C, y que el módulo de hormigón se encuentra a una temperatura inicial de 264 °C, para el proceso de carga. Y para el proceso de descarga el hormigón posee una temperatura de 314 °C inicialmente y la temperatura de entrada del fluido térmico es constante y de 264 °C. La diferencia de temperaturas suele ser del orden de 50° C, y el modelo matemático implementado realiza simulaciones con temperaturas de entrada del fluido térmico constantes.

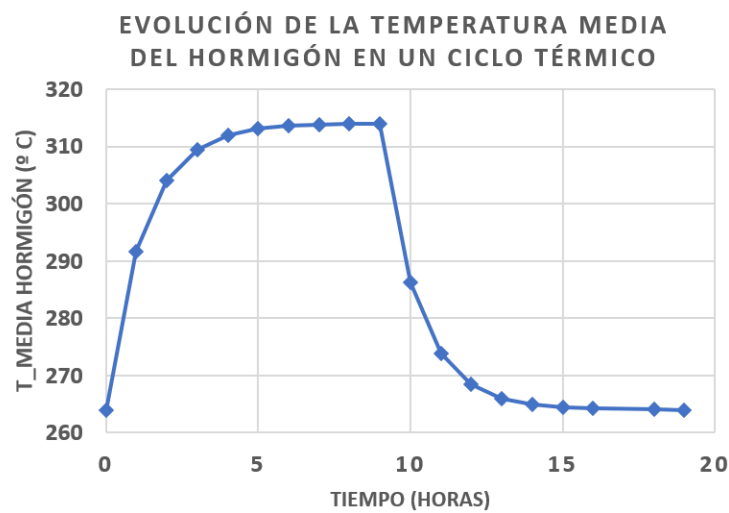
A continuación, se presentan las curvas obtenidas gracias al modelo simplificado, que nos permite conocer el comportamiento del sistema ante unos parámetros de entrada determinados.

En la figura 55 se observa la evolución de la temperatura media del hormigón para en un proceso de carga y descarga, considerando que el sistema se carga al 100 %. No obstante, el modelo matemático simplificado considera que en un tiempo infinito (para el proceso de carga) la temperatura media del hormigón se acerca asintóticamente a la temperatura de entrada del fluido térmico. Por este motivo, se puede considerar el tiempo de carga, como el tiempo en el que tarda en almacenarse el 95 o el 90 % de la energía total que podría almacenarse en el bloque de hormigón, por lo tanto, la temperatura media del hormigón cuando alcanza su

máximo no sería la temperatura de entrada del fluido (para el proceso de carga) si no algo más baja. De esta manera obtenemos tiempos de carga mucho menores.

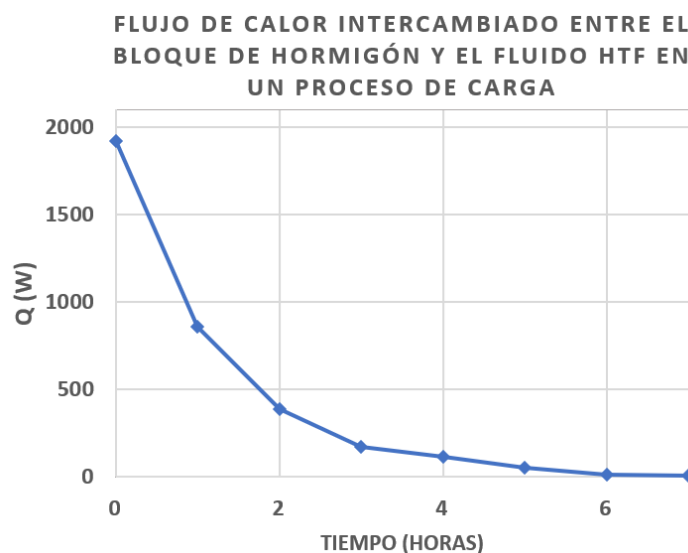
- ❖ Si se considera el tiempo de carga, como el tiempo en el que tarda en almacenarse el 90 % de la energía que se podría almacenar, el sistema se carga en 3 horas.
- ❖ Si se considera el tiempo de carga, como el tiempo en el que tarda en almacenarse el 95 % de la energía que se podría almacenar, el sistema se carga en 4 horas, es decir tarda cuatro horas en llegar al 95 % de su capacidad máxima de almacenamiento.

Esta primera aproximación que se ha tomado es bastante realista ya que, como se ha estudiado en el apartado de aplicaciones, el sistema que se carga durante las horas de irradiación solar, y lo ideal es realizar un prediseño de un TES que se cargue durante 4 o 5 horas.



**Figura 55.** Evolución de la temperatura media del hormigón en un ciclo térmico.

La figura 56 refleja el flujo de calor intercambiado entre el hormigón que rodea a un solo tubo, para un proceso de carga, para el proceso de descarga se obtienen resultados similares.



**Figura 56.** Flujo de calor intercambiado entre el hormigón y el fluido térmico.

En cuanto a la energía almacenada por el bloque de hormigón que rodea a un solo tubo, y la liberada por el mismo, se muestra a continuación la gráfica que refleja estos resultados en kWh. Cabe destacar que la energía total almacenada o liberada por el sistema de almacenamiento completo (40 tubos) es de 122 kWh.

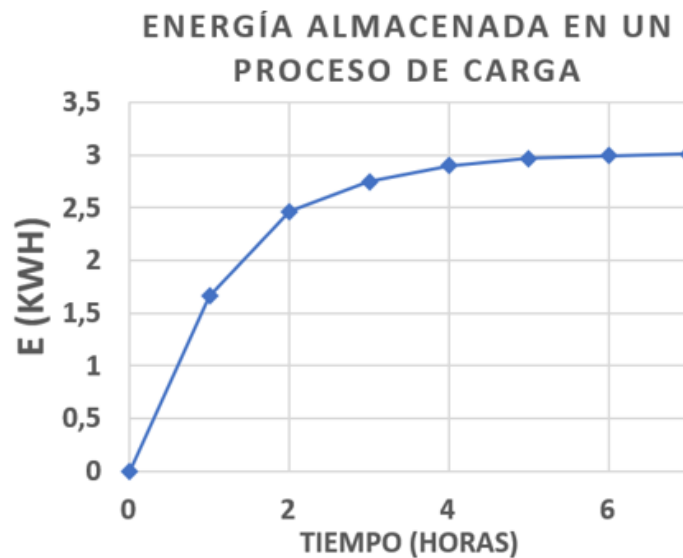
La capacidad total del sistema también se puede calcular gracias a la siguiente expresión:

$$Q_c^{stg} = M_c \cdot C_{p,avg} \cdot \Delta T$$

Siendo la masa del hormigón:

$$M_c = \rho_c \cdot V_h \cdot N_{tubos}$$

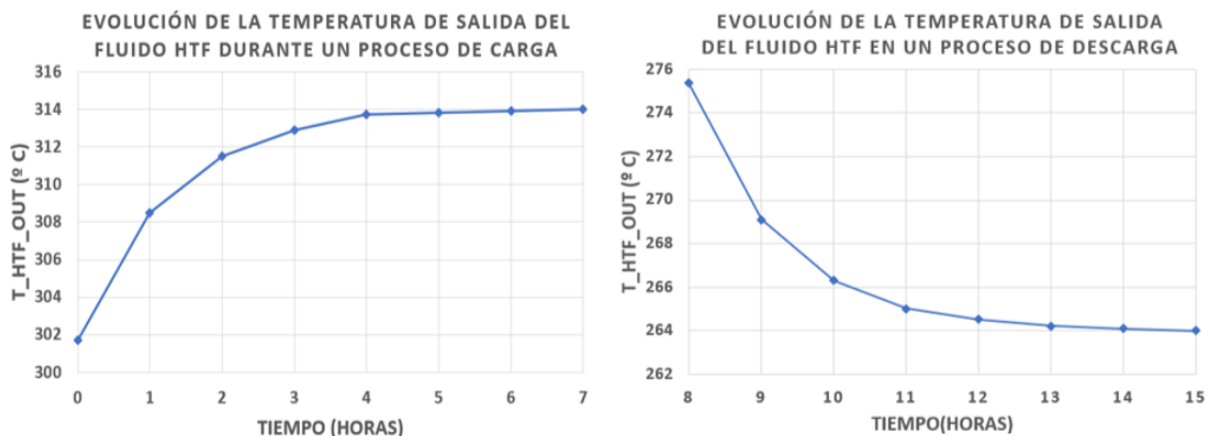
Siendo  $V_h$  el volumen de hormigón que rodea a un solo tubo. Al realizar este cálculo se obtiene una capacidad de almacenamiento del sistema completo de 122 kWh. Y la masa total de hormigón es de 8,919 toneladas. En la figura 57 se puede observar una energía almacenada o liberada por el bloque de hormigón que rodea a un solo tubo es de 3,05 kWh, al multiplicarlo por el número de tubos, también se obtiene la capacidad de almacenamiento del sistema (122 kWh).



**Figura 57.** Energía almacenada/liberada por el módulo de hormigón (que rodea a un solo tubo).

- ❖ Si se considera que el tiempo de carga es aquel en el que se almacena el 90 % de la capacidad máxima de almacenamiento, el bloque de hormigón que rodea a un solo tubo almacena 2,745 kWh, es decir, el sistema completo compuesto por cuarenta tubos permite almacenar 109,8 kWh.
- ❖ Si se considera que se para la carga del sistema cuando se llega al 95 % de la capacidad máxima de almacenamiento, se almacenan 2,89 kWh (por el bloque de hormigón que rodea a un solo tubo), es decir, el sistema completo almacena: 116 kWh.

En la figura 58 se refleja la evolución de la temperatura de salida del fluido de transferencia térmica durante el proceso de carga y descarga al sistema.



**Figura 58.** Evolución de la temperatura de salida del HTF



## 5.2.2 Análisis paramétrico y discusión

En este apartado se va a realizar un análisis de sensibilidad de este sistema. Se va a analizar en primer lugar como varía el tiempo de carga y de descarga del sistema, el flujo de calor intercambiado y la energía almacenada/liberada en un periodo de tiempo (capacidad de almacenamiento) al variar:

- ❖ La velocidad del fluido térmico.
- ❖ La geometría del sistema ( $d_i$ ,  $d_o$ , número de tubos, longitud).
- ❖ La resistencia de contacto entre el tubo y el hormigón.
- ❖ La diferencia de temperaturas (entre el fluido térmico y el bloque de hormigón).
- ❖ El tipo de mezcla de hormigón y el fluido utilizado.

### 5.2.2.1 Análisis al variar la velocidad del fluido térmico

En el presente subapartado se va a observar qué ocurre al variar la velocidad del fluido térmico que circula por un tubo, esta se relaciona con el caudal másico mediante la siguiente ecuación:

$$q_{m_{HTF}} = A_{tubo} \cdot \rho_{HTF} \cdot V_{HTF}$$

Al aumentar o disminuir la velocidad suministrada al fluido, varía el caudal másico del mismo, y el número de Nusselt y Reynolds, estos influyen en los factores correctores que a su vez influyen en el tiempo de carga, en la evolución del flujo de calor intercambiado entre el bloque de hormigón y el fluido térmico. Por otro lado, al aumentar o disminuir la velocidad del fluido térmico el volumen del prisma que rodea a un único tubo permanece invariable, y el número de tubos también, por lo tanto, el volumen del sistema completo no varía. Por otra parte, los parámetros  $L_c$ ,  $\eta$ , y  $A_r$  también se mantienen constantes.

En la figura 59 se puede observar gráficamente como varía el caudal másico al variar la velocidad del fluido térmico en el tubo. En la figura 60 se muestran las variaciones del Nusselt y del Reynolds.

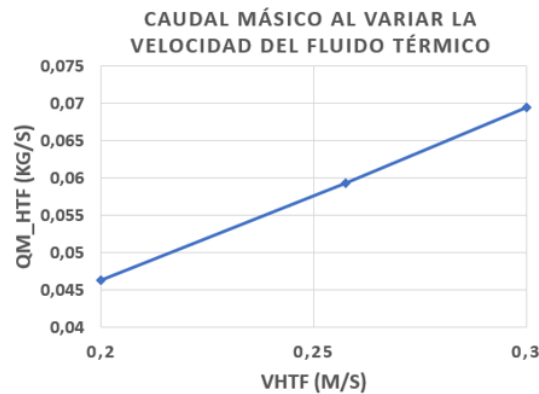


Figura 59. Caudal másico del fluido térmico que circula por un tubo al variar la velocidad del mismo.

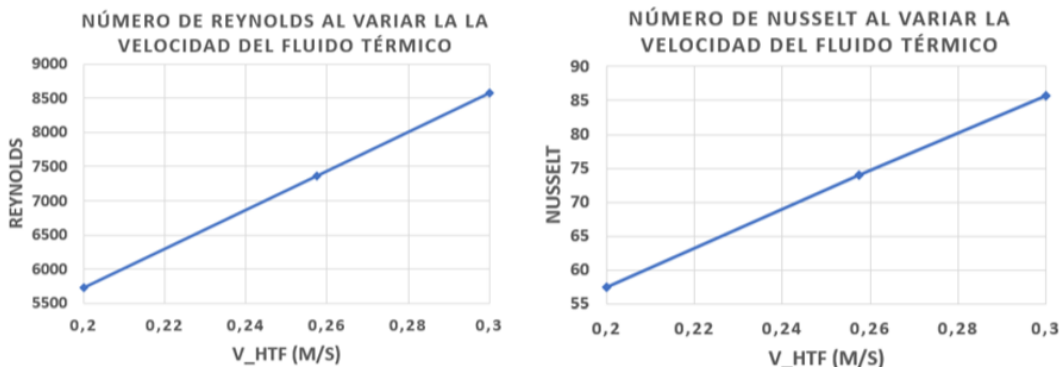


Figura 60. Nusselt y Reynolds al variar la velocidad del fluido térmico.

En la figura 61 se muestra la evolución de la temperatura media del hormigón, el flujo de calor intercambiado entre el bloque de hormigón (que rodea a un solo tubo) y el fluido térmico, la energía almacenada por el bloque de hormigón que rodea a un tubo y la evolución de la temperatura de salida del fluido térmico durante el proceso de carga para velocidades de 0,2 m/s; 0,2575 m/s y 0,3 m/s.

En la figura 61 se puede observar que al aumentar velocidad del fluido térmico ocurre lo siguiente:

- ❖ El tiempo de carga y de descarga, disminuye.
- ❖ El flujo de calor intercambiado es mayor al inicio, pero a medida que transcurre el tiempo se intercambia menos calor, es decir como la velocidad del fluido térmico es mayor transfiere calor de forma más rápida, por lo tanto, en las primeras horas transfiere mayor cantidad de calor, y en las últimas horas transfiere menor cantidad de calor. En el proceso de descarga la tendencia de los resultados es similar al proceso de carga.
- ❖ Se almacena energía en menor tiempo, sin embargo, se almacena la misma cantidad de energía, por lo tanto, no aumenta la capacidad de almacenamiento del sistema, siendo esta de 122 kWh para el sistema formado por 40 tubos. Para la energía liberada en un proceso de descarga ocurre lo mismo se libera de forma más rápida la energía si aumenta la velocidad del fluido térmico
- ❖ La temperatura de salida del fluido térmico en un proceso de carga es mayor si la velocidad del fluido térmico es más alta y esto favorece a una respuesta más rápida del sistema.

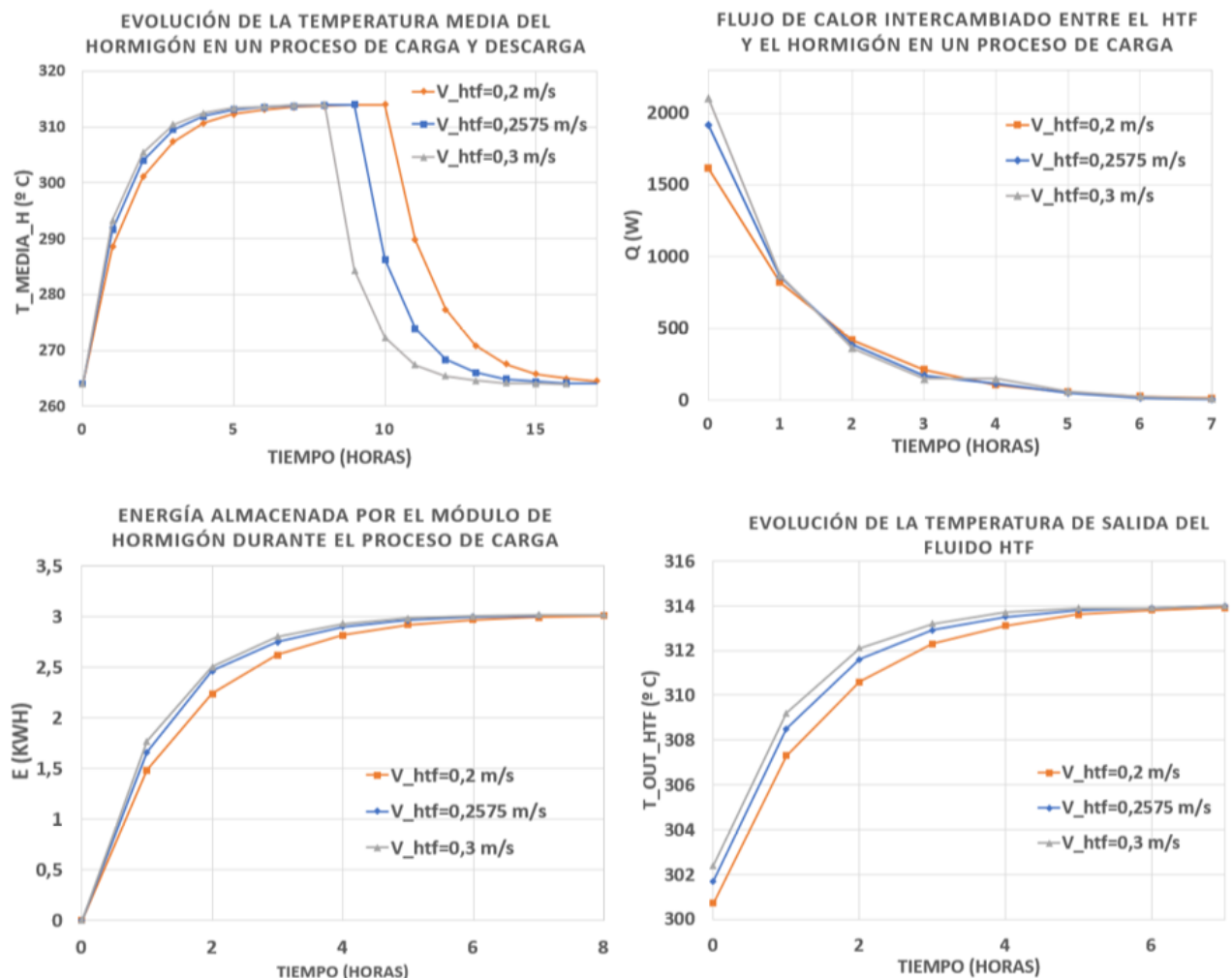


Figura 61. Evolución de temperaturas y energías al variar la velocidad del HTF.

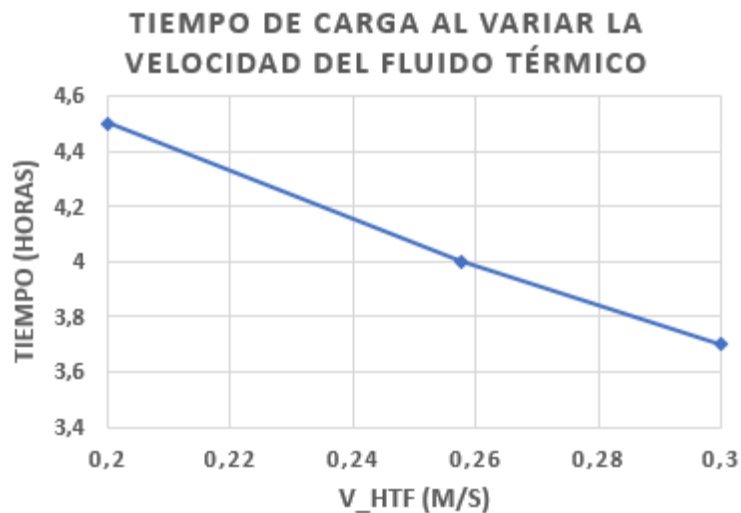
Si se considera el tiempo de carga el tiempo que tarda en almacenarse el 95 % de la capacidad de

**almacenamiento.**

En la figura 62 se muestra cómo varía el tiempo de carga al sistema al variar la velocidad del fluido térmico (0,2 m/s; 0,2575 m/s y 0,3 m/s), cargando el sistema al 95 % de su capacidad total.

Si se considera como tiempo de carga, el tiempo que tarda en almacenarse el 95 % de la energía que se podría almacenar en el bloque de hormigón, el tiempo de carga es de 4 horas si la velocidad del fluido térmico es de 0,2575 m/s, si la velocidad es de 0,2 m/s el tiempo de carga sería de 4 horas y media y si la velocidad es de 0,3 m/s el tiempo de carga algo superior a 3 horas y media. A continuación se puede observar como varía el tiempo de carga al variar la velocidad del fluidp HTF.

Si se almacena el 95 % de la capacidad del almacenamiento total que podría tener el sistema, se almacenarían 116 kWh.

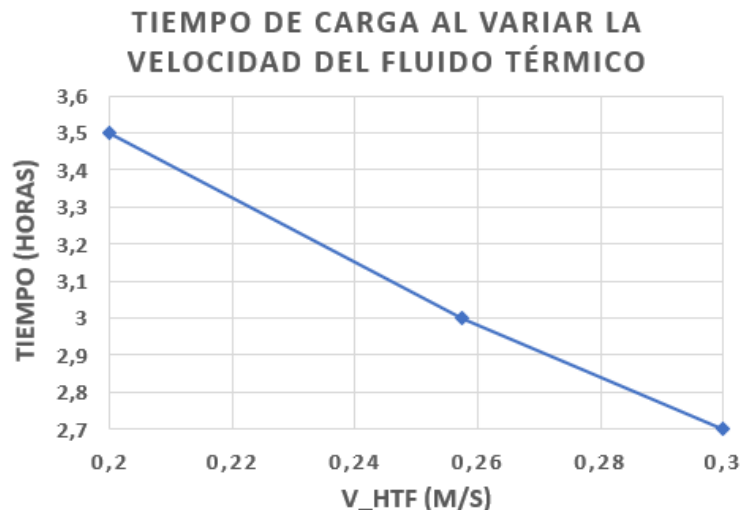


**Figura 62.** Tiempo de carga al variar la velocidad del HTF, cargando el sistema al 95 %.

**Si se considera el tiempo de carga el tiempo que tarda en almacenarse el 90 % de la capacidad de almacenamiento.**

En la figura 63 se muestra gráficamente como varía el tiempo de carga en función de la velocidad del fluido térmico, considerando que el sistema se ha cargado cuando se almacena el 90 % de la energía total que podría almacenar el sistema.

Si se almacena el 90 % de la capacidad del almacenamiento total que podría tener el sistema, se almacenarían 109,8 kWh.



**Figura 63.** Tiempo de carga al variar la velocidad del HTF, cargando el sistema al 90 %.

### 5.2.2.2 Análisis al variar la distancia de centro a centro entre los tubos (número de tubos constante)

Al aumentar la distancia de centro a centro de los tubos (manteniendo constante el número de tubos) aumenta el volumen del prisma de hormigón que rodea a un único tubo, y en consecuencia el volumen total del sistema. Al aumentar el volumen del prisma hexagonal de hormigón también varía:

- $L_c$ ,  $\eta$ , y  $A_r$
- $L_c$ , influye en los factores correctores
- Los factores correctores van a influir en la evolución de la temperatura media del hormigón, en el flujo de calor intercambiado y en la energía almacenada en el bloque de hormigón.

En la figura 64 y 65 se muestra como varía  $L_c$ ,  $\eta$ , y  $A_r$ , y el volumen total de hormigón al aumentar la distancia de centro a centro entre los tubos, siendo esta de  $d_o=0,11$  m;  $d_o=0,12$  m;  $d_o=0,13$  m.

- Si la distancia de centro a centro entre los tubos es de 0,11 m, las dimensiones del módulo de hormigón equivalente (40 tubos y 10 m de longitud) son de  $0,88 \times 0,88 \times 10 \text{ m}^3$ .
- Si la distancia de centro a centro entre los tubos es de 0,12 m, las dimensiones del módulo de hormigón equivalente (40 tubos y 10 m de longitud) son de  $0,96 \times 0,96 \times 10 \text{ m}^3$ .
- Si la distancia de centro a centro entre los tubos es de 0,13 m, las dimensiones del módulo de hormigón equivalente (40 tubos y 10 m de longitud) son de  $1,04 \times 1,04 \times 10 \text{ m}^3$ .

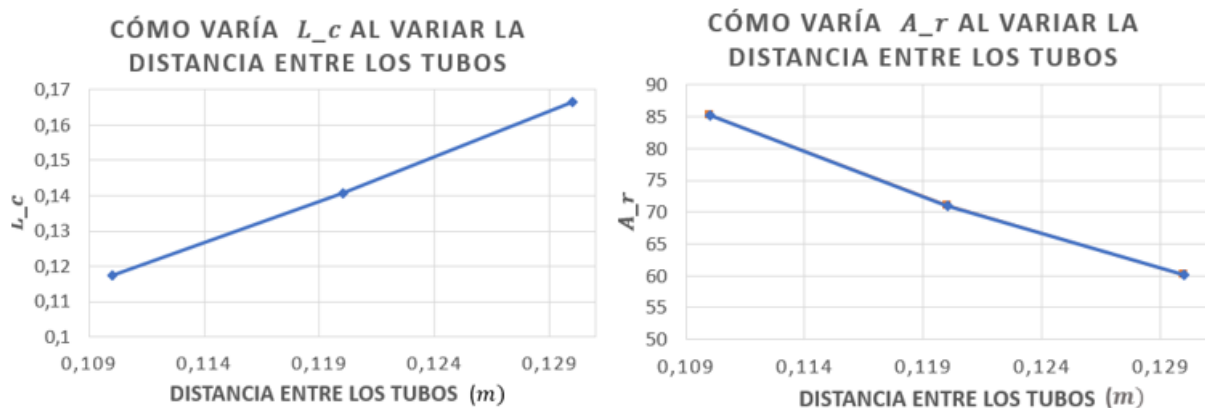


Figura 64. Valores de  $L_c$ ,  $A_r$  al aumentar la distancia entre los tubos.

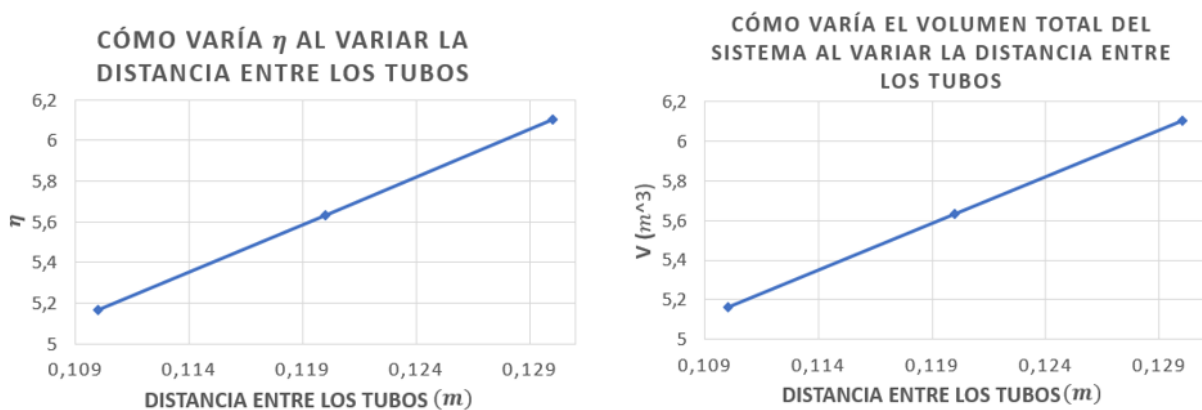
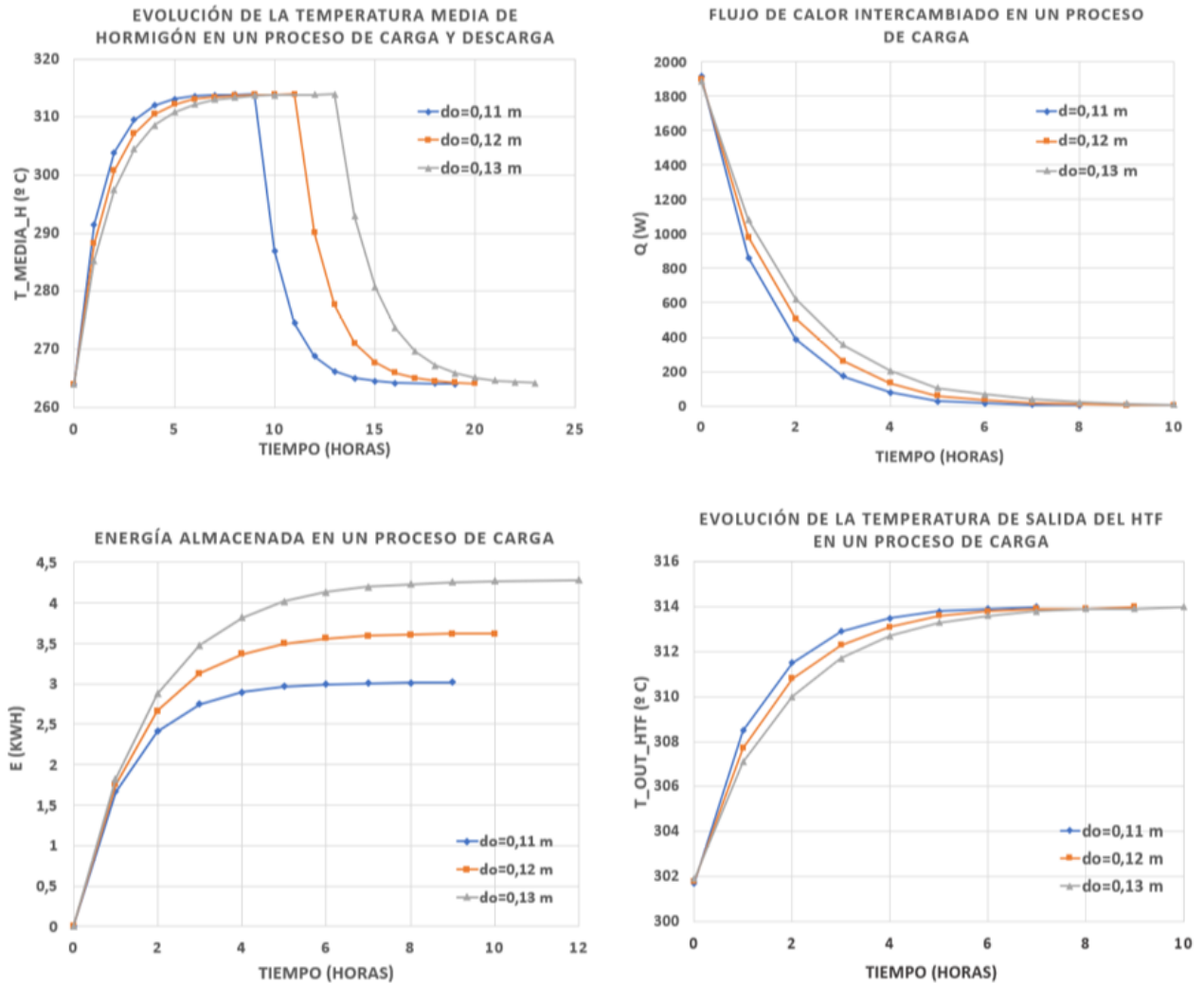


Figura 65. Valores de  $\eta$  y del volumen del sistema al aumentar la distancia entre los tubos.

Al variar la distancia de centro a centro de los tubos se mantienen constantes otros parámetros como son:

- Número de tubos (se ha elegido así para este análisis)

- Propiedades del fluido térmico
- Área del tubo (ya que no se elige un tubo diferente)
- Área de la interfaz tubo-hormigón
- Velocidad y caudal másico del fluido térmico que circula por un tubo, y en consecuencia el Reynolds, Prandtl y Nusselt.



**Figura 66.** Evolución de temperaturas y energías al variar la distancia entre los tubos.

En la figura 66, se muestra la evolución de la temperatura media del hormigón, el flujo de calor intercambiado entre el bloque de hormigón (que rodea a un solo tubo) y el fluido térmico durante el proceso de carga, la energía almacenada por el bloque de hormigón que rodea a un tubo durante el proceso de carga al sistema, y la evolución de la temperatura de salida del fluido térmico (durante el proceso de carga), al variar la distancia de centro a centro entre los tubos.

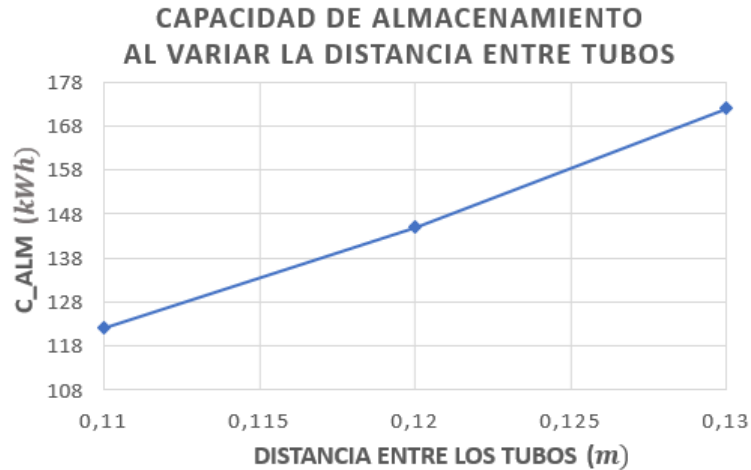
De la figura 66 se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- ❖ A mayor distancia aumenta el tiempo de respuesta al sistema, es decir el tiempo de carga y descarga aumenta, ya que el volumen de hormigón que va a calentar es mayor.
- ❖ A mayor distancia, se intercambia calor entre el hormigón y el fluido HTF de forma más lenta.
- ❖ Se almacena mayor cantidad de energía en el bloque de hormigón que rodea a un solo tubo ya que al aumentar la distancia entre los tubos aumenta el volumen del prisma hexagonal (y en consecuencia el

volumen total del bloque de hormigón), por lo tanto, aumenta la capacidad de almacenamiento del sistema completo.

- ❖ La evolución de la temperatura de salida del fluido térmico en un proceso de carga es más lenta, es decir se tarda más tiempo en igualar la temperatura de entrada del fluido HTF si la distancia entre los tubos es mayor, esto se debe a que en este caso se transfiere energía a un bloque de hormigón más grande.

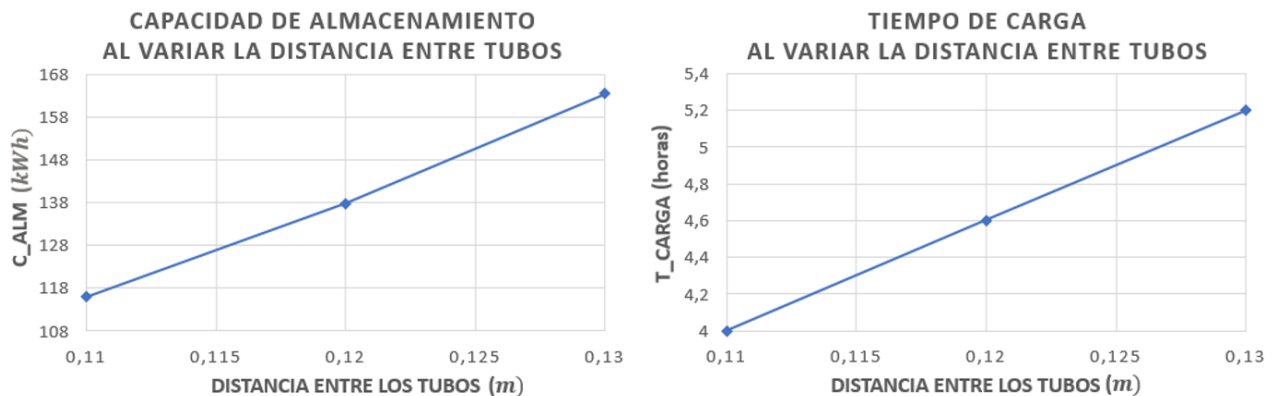
A continuación, en la figura 67 se puede observar la capacidad de almacenamiento total al variar la distancia entre los tubos.



**Figura 67.** Capacidad de almacenamiento total al variar la distancia entre los tubos.

**Si se considera el tiempo de carga el tiempo que tarda en almacenarse el 95 % de la capacidad de almacenamiento.**

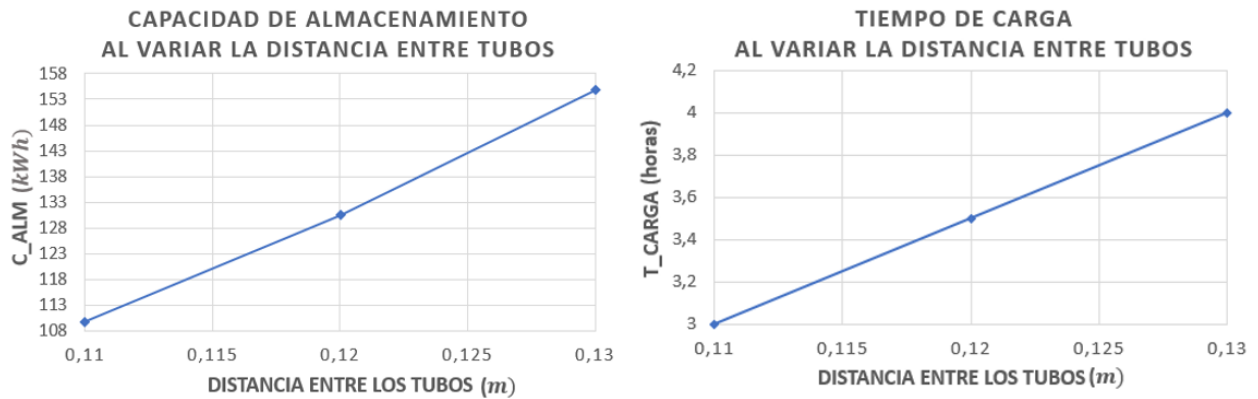
En la figura 68 se puede observar cómo varía el tiempo de carga al sistema, teniendo en cuenta que se considera como tiempo de carga el tiempo que tarda en almacenarse el 95 % de la energía que se podría almacenar en el bloque de hormigón, y la capacidad de almacenamiento al 95 % de un sistema de 40 tubos, al variar la distancia entre estos, es decir al aumentar el volumen del bloque de hormigón, aumenta la capacidad de almacenamiento.



**Figura 68.** Tiempo de carga y capacidad de almacenamiento si se almacena el 95 % de la energía total

**Si se considera el tiempo de carga el tiempo que tarda en almacenarse el 90 % de la capacidad de almacenamiento.**

En la figura 69 se muestra como varía el tiempo de carga y la capacidad de almacenamiento al variar la distancia entre los tubos (manteniendo el número de tubos constante, es decir aumenta el volumen del prisma de hormigón y el volumen del sistema total) si se considera que se almacena el 90 % de la energía total que podría almacenarse por el sistema.



**Figura 69.** Tiempo de carga y capacidad de almacenamiento si se almacena el 90 % de la energía total.

### 5.2.2.3 Análisis al variar la distancia de centro a centro de los tubos y el número de tubos

Si se mantiene constante la masa del bloque total de hormigón y por lo tanto el volumen total de hormigón se mantiene invariable; el número de tubos varía si variamos la distancia entre los mismos, para realizar este análisis varía la distancia de centro a centro de los tubos, esta se supone de 0,11 m en el caso base, y se aumenta a 0,12 m y 0,13 m.

Para realizar este análisis se da la capacidad de almacenamiento (por lo tanto, esta se mantiene constante) y a partir de esta se obtiene la masa del hormigón, una vez obtenida la masa del hormigón se obtiene el número de tubos. Las dimensiones del módulo de hormigón son constantes de  $0,88 \times 0,88 \times 10 \text{ m}^3$ , para el sistema equivalente.

Al programa realizado en EES (Engineering Equation Solver) se le añaden las ecuaciones que se muestran a continuación y el número de tubos deja de ser un parámetro de entrada. Dada la capacidad de almacenamiento se obtiene la masa de hormigón de la primera ecuación, de la segunda ecuación se obtiene el número de tubos.

$$Q_c^{stg} = M_c \cdot C_{p,c} \cdot \Delta T$$

$$M_c = \rho_c \cdot V_h \cdot N_{tubos}$$

En la tabla 22 se muestra como al aumentar la distancia de centro a centro de los tubos, el número de tubos varía.

$d_o$	$N_{tubos}$
<b>0,11 m</b>	<b>40</b>
<b>0,12 m</b>	<b>34</b>
<b>0,13 m</b>	<b>28</b>

**Tabla 21.** Equivalencia distancia de centro a centro de los tubos y número de tubos.

Aumentar la distancia de centro a centro de los tubos y mantener el volumen del sistema constante; aumenta el volumen del prisma hexagonal que rodea a un solo tubo, y en consecuencia se pueden instalar menos tubos en el sistema; este hecho hace que aumenten los parámetros adimensionales  $L_c$  y  $\eta$ ; y  $A_r$  disminuya. Los valores de los parámetros  $L_c$ ,  $\eta$  y  $A_r$  son los mismos que los que se han recogido en el apartado 5.2.2.2

En la figura 70 se muestra la evolución de la temperatura media del hormigón, el flujo de calor intercambiado entre el fluido térmico y el bloque de hormigón, la energía almacenada por el bloque de hormigón y la temperatura de salida del fluido térmico en un proceso de carga.

De la figura 70, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- ❖ Al aumentar la distancia entre los tubos el tiempo de carga aumenta, ya que, al ser el volumen total del sistema constante, el número de tubos disminuye, es decir al haber menos tubos (manteniendo constante el caudal y la velocidad del fluido térmico) el volumen del prisma hexagonal que rodea a un solo tubo es mayor, por lo tanto, el tiempo de carga aumenta al tener que calentar un bloque de hormigón de mayor tamaño con un solo tubo.
- ❖ El flujo de calor intercambiado entre el fluido térmico y el bloque de hormigón que rodea a un solo tubo aumenta al disminuir el número de tubos.
- ❖ Al mantener la capacidad de almacenamiento constante, la energía que permite almacenar el bloque de hormigón que rodea a un solo tubo, aumenta, al disminuir el número de tubos, es decir, al aumentar la distancia de centro a centro de los tubos.
- ❖ En cuanto a la evolución temporal de temperatura de salida del fluido térmico, la respuesta del sistema es más lenta al aumentar la distancia entre los tubos (se tiene un número de tubos menor).

Si se considera el tiempo de carga el tiempo que tarda en almacenarse el 95 % de la capacidad de almacenamiento este es de 4 horas si la distancia entre los tubos es de 0,11 m (40 tubos), de 4,6 horas si la distancia es de 0,12 m (34 tubos), y 5,2 horas si la distancia es de 0,13 m (28 tubos), se obtienen los mismos resultados que en el análisis anterior, donde de muestra gráficamente el tiempo de carga en función de la distancia entre los tubos.

Si consideramos el tiempo de carga el tiempo que tarda en almacenarse el 90 % también se obtienen resultados similares a los obtenidos en el análisis anterior.

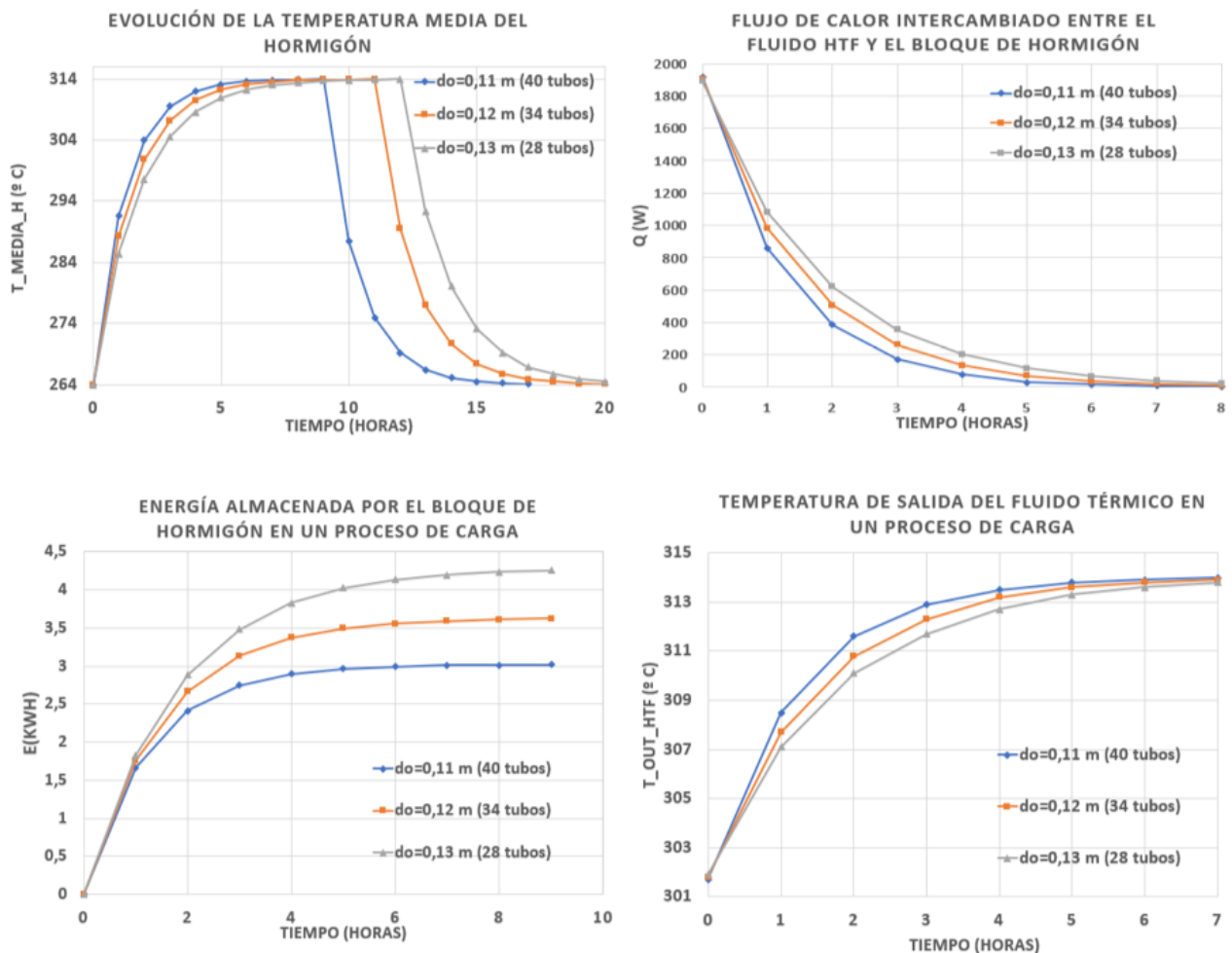


Figura 70. Evolución de las temperaturas y energías al variar la distancia entre los tubos.

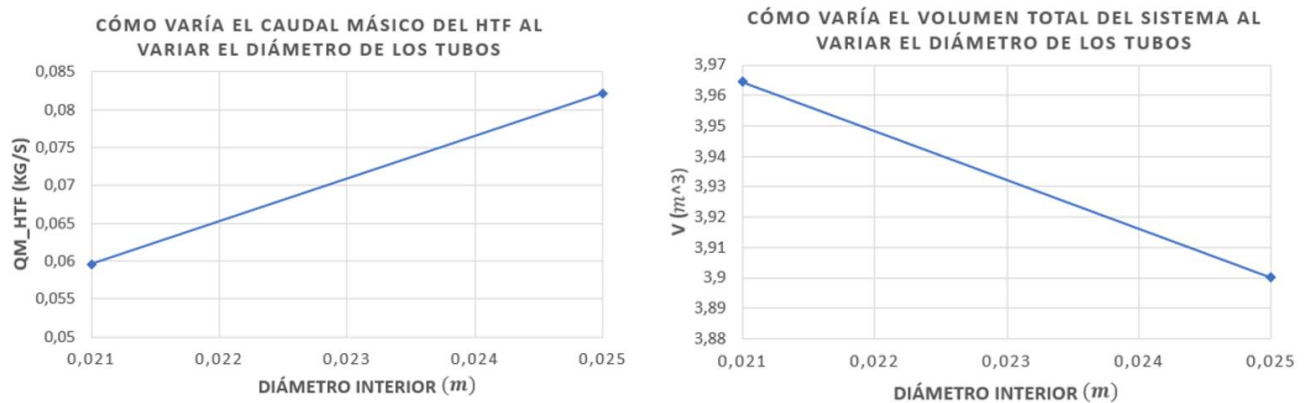


### 5.2.2.4 Análisis al variar el diámetro de los tubos

Al aumentar el diámetro de los tubos aumenta el área del cilindro (del tubo recto inmerso en el bloque de hormigón) y varían los siguientes parámetros:

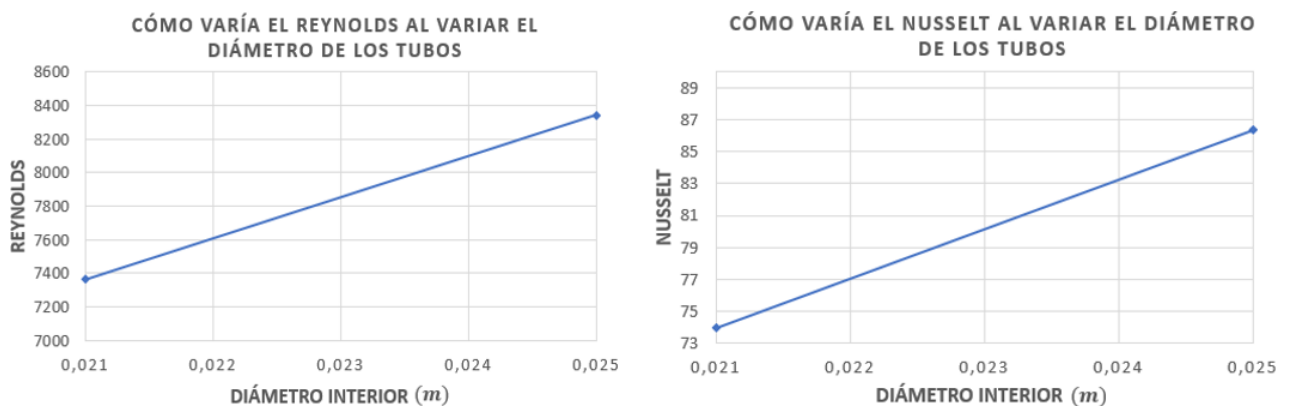
- Aumenta el caudal másico del fluido térmico que circula por el tubo, teniendo en cuenta que la velocidad del fluido térmico se mantiene constante.
- Disminuye ligeramente el volumen de hormigón que rodea a un solo tubo, y por lo tanto el volumen total.
- Aumenta el área de la interfaz tubo hormigón (área lateral del cilindro).
- Disminuye ligeramente la masa de hormigón.
- El número de Reynolds y el Nusselt aumentan, ya que el número de Reynolds depende del diámetro interior del tubo.

En la figura 71 se muestra como varía el caudal másico que circula por un tubo y como varía el volumen total del sistema al variar el diámetro de los tubos (de un diámetro interior del tubo de 0,0213 m a 0,025 m).



**Figura 71.** Volumen total del sistema y caudal másico del fluido térmico al variar el diámetro.

En la figura 72 se muestra gráficamente como varía el número de Reynolds y el número de Nusselt; siendo en el caso base, el diámetro interior de 0,0213 m, y el diámetro exterior de 0,0269 m; y este varía a un diámetro interior de 0,025 m y un diámetro exterior de 0,03 m.

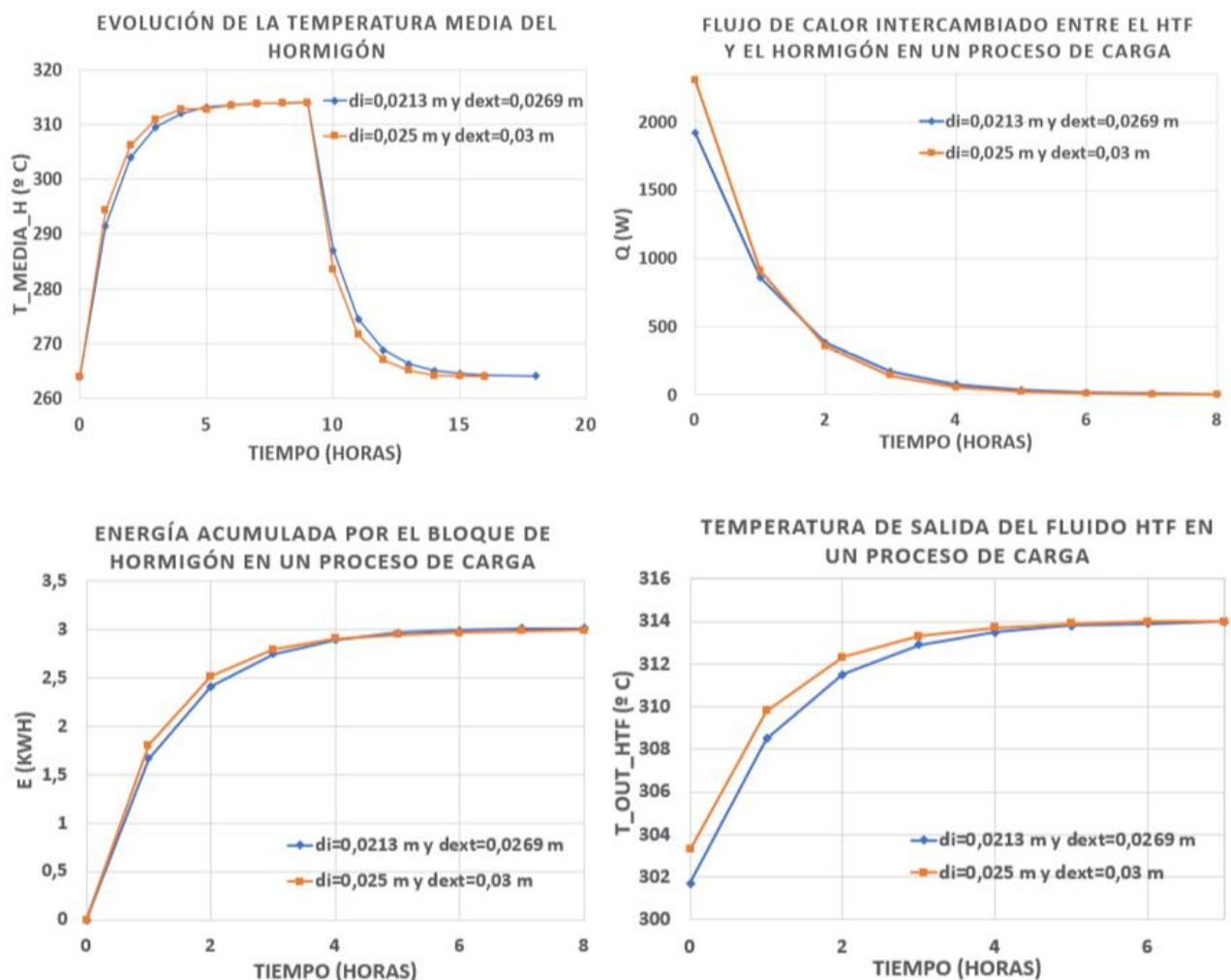


**Figura 72.** Reynolds y Nusselt al variar el diámetro de los tubos.

En la figura 73, se muestra la evolución de la temperatura media del bloque de hormigón, el flujo de calor intercambiado entre el fluido térmico y el bloque de hormigón que rodea a un solo tubo, la energía almacenada

por el bloque de hormigón (que rodea a un solo tubo) y la temperatura de salida del fluido térmico, de esta, se pueden obtener las siguientes conclusiones de diseño al variar el diámetro de los tubos:

- ❖ El tiempo de carga y descarga es muy similar al aumentar o disminuir el diámetro de los tubos. Sin embargo, al mantener constante la velocidad del fluido térmico, aumenta el caudal del fluido térmico que circula por cada tubo al aumentar el diámetro de estos, por lo tanto, la respuesta del sistema es algo más rápida.
- ❖ El flujo de calor intercambiado aumenta al principio y disminuye al final, debido a que el caudal del fluido térmico es mayor al aumentar el diámetro de los tubos.
- ❖ La energía almacenada por el hormigón en un proceso de carga es algo menor ya que hay menos masa de hormigón, pero es prácticamente invariable, además se almacena esta energía de forma más rápida.
- ❖ La evolución de la temperatura de salida del fluido térmico tiene una respuesta más rápida al aumentar el diámetro de los tubos, es decir, se adquiere la temperatura de entrada del fluido térmico de manera más rápida, aunque esta variación es muy ligera.
- ❖ El tiempo de carga y la energía almacenada varía ligeramente, sin embargo, esta variación es ínfima. Disminuye ligeramente el tiempo de carga al aumentar el diámetro de los tubos (manteniendo la velocidad del fluido térmico que circula por los mismos constante), y disminuye la capacidad de almacenamiento ligeramente al disminuir el volumen del bloque de hormigón. El tiempo de carga es aproximadamente de 4 horas si se almacena el 95 % de la energía que podría almacenarse, al aumentar el diámetro podría almacenarse en unos 10 minutos menos.



**Figura 73.** Evolución de las temperaturas y energías al variar el diámetro de los tubos.

De este estudio se obtiene un dato muy interesante, variar el diámetro de los tubos embebidos en el bloque de hormigón, influye muy poco en la respuesta del sistema.

A parte de los diámetros que se muestran en la figura 72, se ha probado con otros diámetros y las modificaciones en el sistema son muy pequeñas.

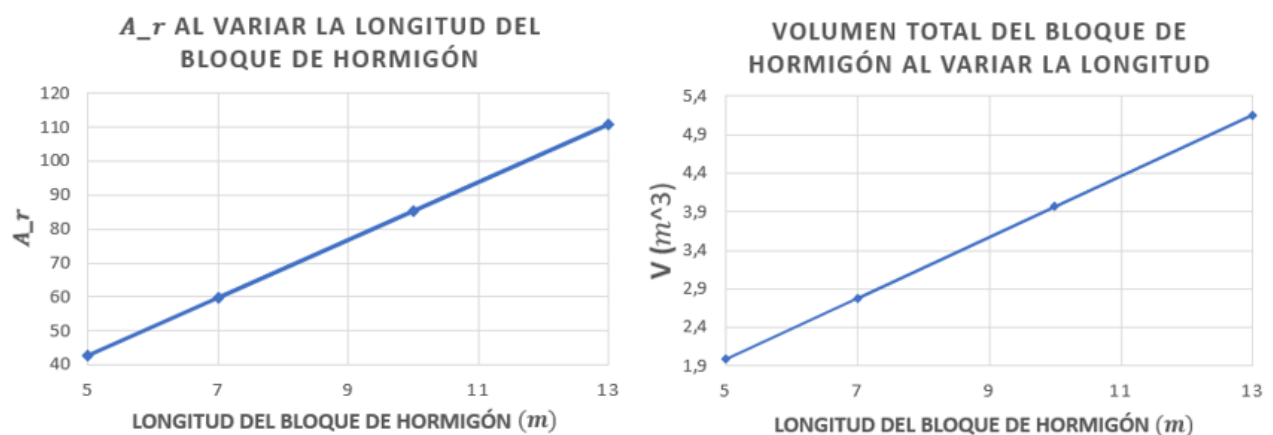
### 5.2.2.5 Análisis al variar la longitud del módulo de almacenamiento

Al variar la longitud del módulo de almacenamiento, va a variar:

- El volumen del hormigón que rodea a un solo tubo, y, en consecuencia, el volumen del hormigón total.
- El área de la interfaz tubo-hormigón.
- El parámetro adimensional,  $A_r$ .
- Al variar la longitud del módulo de hormigón también varían los factores correctores que influyen en la evolución de la temperatura media del hormigón, en el calor intercambiado, la energía almacenada por el bloque de hormigón y la evolución de la temperatura de salida del fluido térmico.

En la figura 74, se muestra como varía el parámetro  $A_r$  y el volumen total del bloque de hormigón al variar la longitud de este, como puede observarse en la gráfica el parámetro  $A_r$ , aumenta, al aumentar la longitud del bloque de hormigón y el volumen total del módulo de hormigón también aumenta. El análisis se realiza con longitudes del módulo de hormigón de 5 metros, 7 metros, 10 metros (caso base) y 13 metros.

Al variar el volumen del hormigón que rodea un solo tubo y la longitud del módulo, el parámetro  $L_c$  se mantiene constante, la velocidad y el caudal másico del fluido térmico se mantienen constantes por lo tanto Reynolds, Nusselt y Prandtl se mantienen constantes, ya que las propiedades del fluido térmico tampoco varían.



**Figura 74.** El parámetro  $A_r$  y el volumen total del bloque de hormigón al variar la longitud.

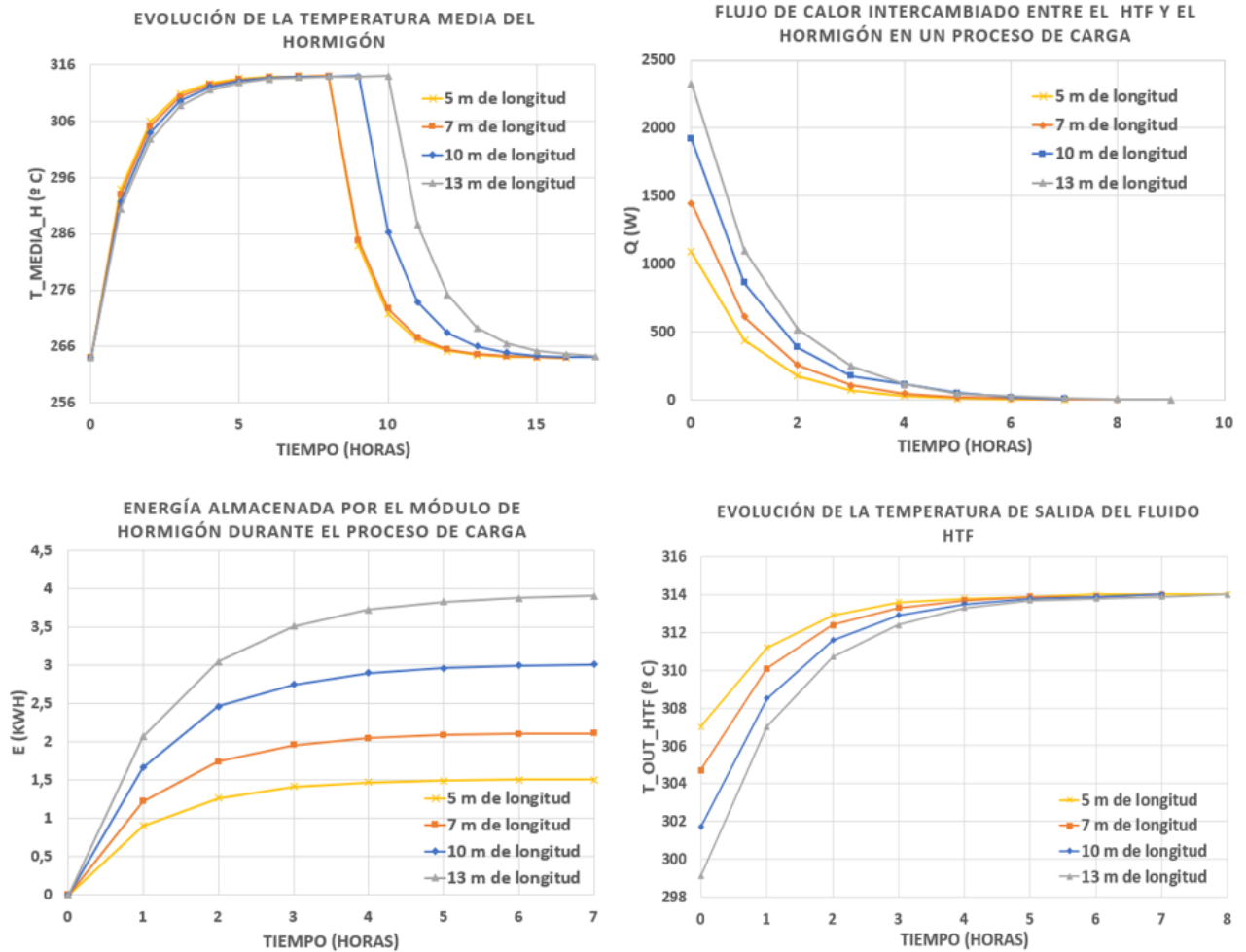
En la figura 75 se muestra la evolución de la temperatura media del hormigón, la evolución del calor intercambiado entre el HTF y el bloque de hormigón en un proceso de carga (similar al de descarga), la energía almacenada por el bloque de hormigón que rodea a un solo tubo (similar a la liberada en el proceso de descarga) y la evolución de la temperatura de salida del fluido térmico al variar la longitud del bloque de hormigón en el proceso de carga.

De la figura 75, se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- ❖ El tiempo de carga y descarga aumenta ligeramente al aumentar la longitud del bloque de hormigón.
- ❖ El calor intercambiado es mayor si la longitud del bloque de hormigón aumenta, ya que al ser mayor el volumen del hormigón que rodea a un solo tubo (en consecuencia, es mayor el volumen total), permite mayor intercambio de calor entre el bloque de hormigón y el fluido térmico.
- ❖ La energía almacenada por el prisma hexagonal que rodea a un solo tubo es mayor si la longitud del

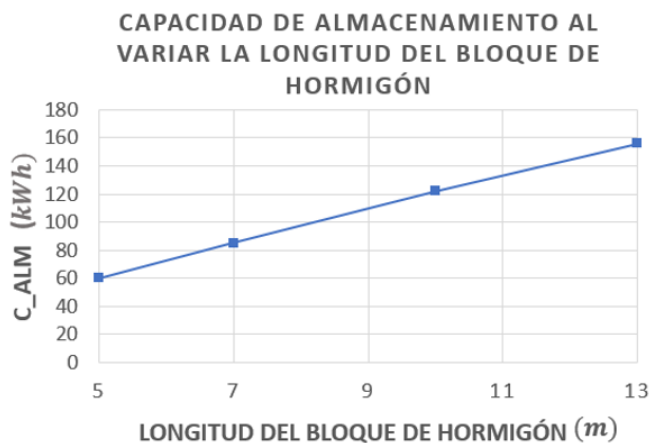
mismo es mayor, es decir, si el volumen del prisma es mayor, permitirá almacenar mayor cantidad de energía.

- ❖ La temperatura de salida del fluido térmico se alcanza más rápidamente si la longitud disminuye.



**Figura 75.** Evolución de las temperaturas y energías al variar la longitud.

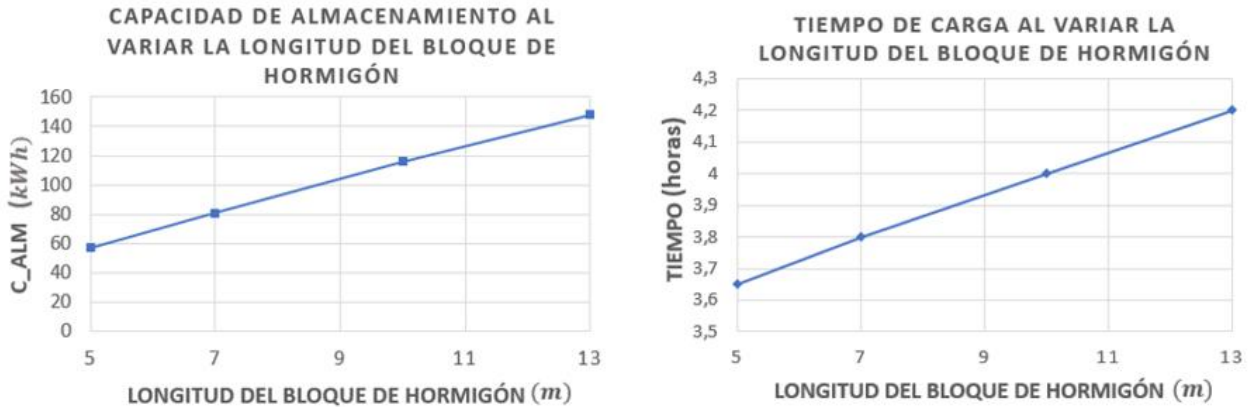
En la figura 76 se puede observar gráficamente cómo varía la capacidad de almacenamiento al variar la longitud del bloque de hormigón, considerando una capacidad de almacenamiento del 100%.



**Figura 76.** Capacidad del almacenamiento al variar la longitud del bloque de hormigón.

**Si se considera el tiempo de carga el tiempo que tarda en almacenarse el 95 % de la capacidad total de almacenamiento.**

El tiempo de carga al sistema y la capacidad de almacenamiento varía en función de la longitud del bloque de hormigón tal y como se puede observar en la figura 77.

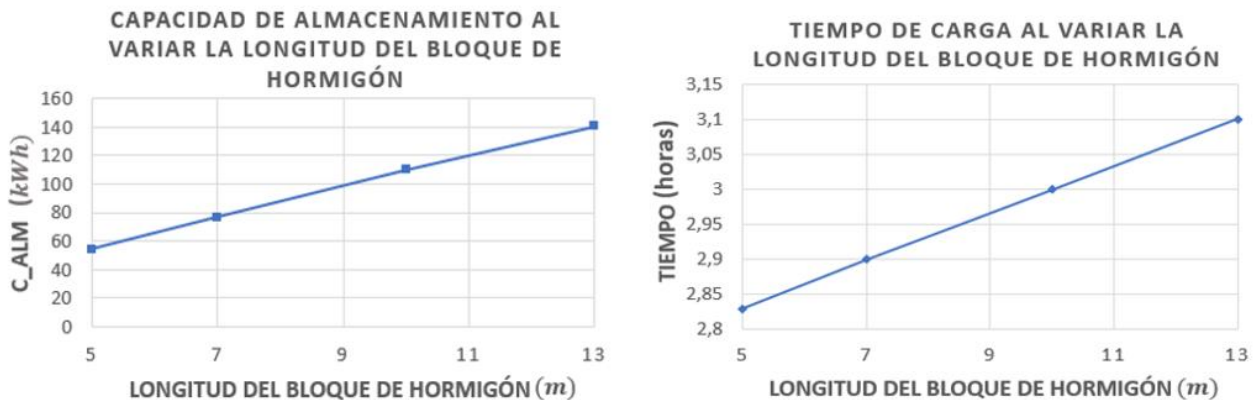


**Figura 77.** Capacidad de almacenamiento y tiempo de carga si se almacena el 95 %.

Como se puede observar en la figura 77, la capacidad de almacenamiento aumenta al aumentar la longitud ya el volumen del bloque de hormigón aumenta. En cuanto al tiempo de carga este aumenta muy levemente al aumentar la longitud, siendo de 3,6 horas para un bloque de 5 m de longitud, de 3,8 horas para uno de 7 metros, de 4 horas para un bloque de 10 m de longitud, y de 4,2 horas para un bloque de 13 metros de longitud, ya que va a necesitar más tiempo para calentar un bloque de hormigón de más tamaño.

**Si se considera el tiempo de carga el tiempo que tarda en almacenarse el 90 % de la capacidad de almacenamiento.**

En la figura 78, se muestra como varía la capacidad de almacenamiento en función de la longitud del bloque de hormigón; y el tiempo de carga en función de la longitud del bloque de hormigón al considerar que se almacena el 90 % de la energía que podría ser almacenada.



**Figura 78.** Tiempo de carga y capacidad de almacenamiento si se almacena el 90 %.

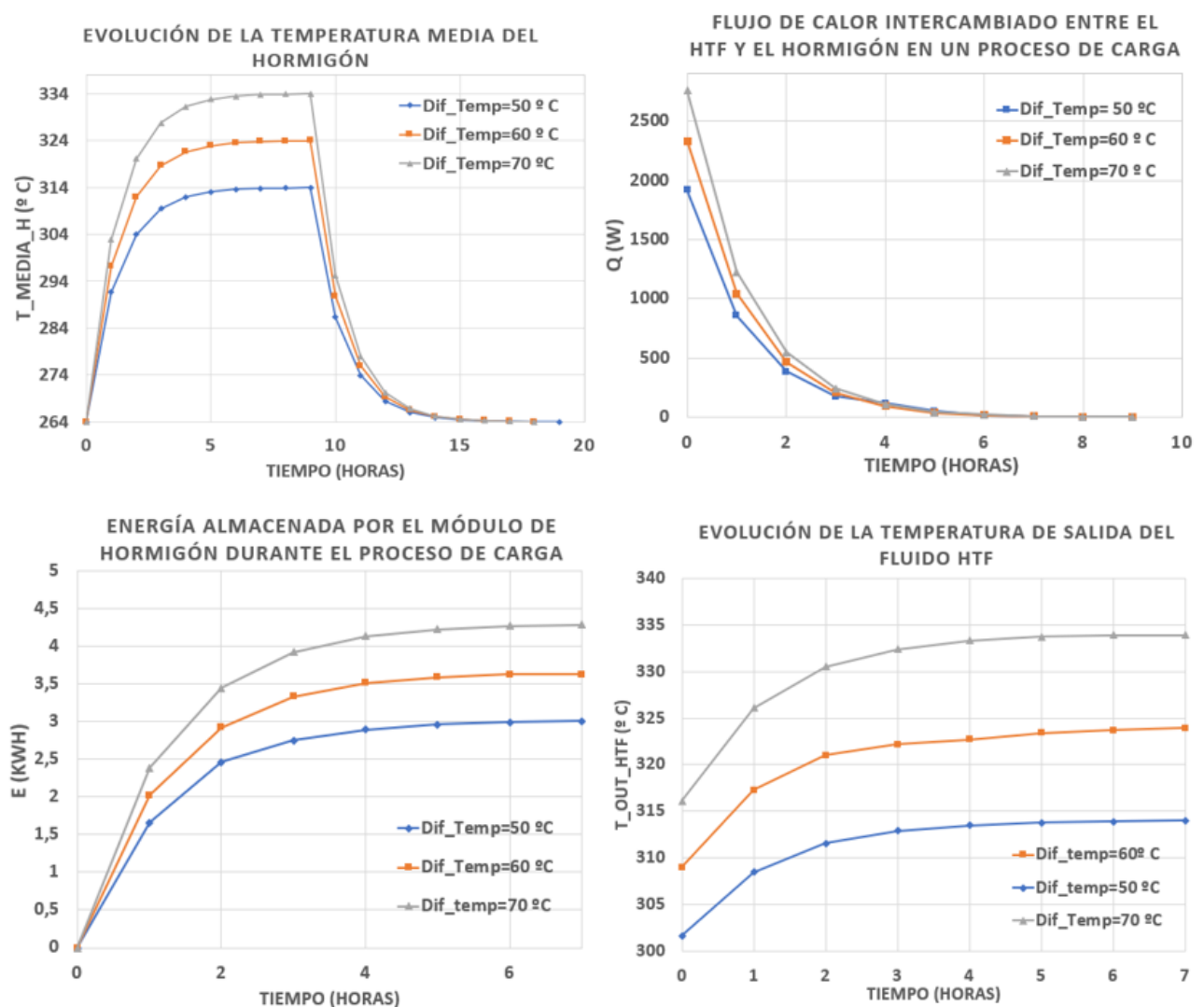
### 5.2.2.6 Análisis al variar la diferencia de temperaturas entre el hormigón y el fluido térmico

Teniendo en cuenta que el sistema de almacenamiento se carga gracias al fluido térmico que proviene de una instalación solar de media temperatura (normalmente captadores cilindro-parabólicos) se trabaja a temperaturas altas.

En el caso base se ha establecido una diferencia de temperaturas de 50 °C, desde 264 °C a 314 °. Al aumentar el salto de temperaturas, a 60 °C y a 70 °C; varían:

- ❖ Las propiedades termofísicas del fluido térmico si este proviene de la instalación solar a mayor temperatura (en el proceso de carga). En el proceso de carga, cuando la diferencia de temperaturas es de 60 °C, se supone que el fluido térmico proviene de la instalación solar a una temperatura de entrada constante de 324 °C; cuando la diferencia de temperaturas es de 70 °C se supone que la temperatura del fluido térmico proviene de la instalación solar a una temperatura de entrada constante 334 °C, y el hormigón se encuentra a una temperatura inicial de 264 °C. En el proceso de descarga el hormigón se encuentra a 314 °C (caso base), a 324 °C (si la diferencia de temperaturas es de 60 °C), y a 334 °C (si la diferencia de temperaturas es de 70 °C) y el fluido térmico tiene una temperatura de entrada constante de 264 °C.
- ❖ Al variar las propiedades termofísicas del fluido térmico, el número de Reynolds y Nusselt varían, y en consecuencia el coeficiente de transferencia de calor convectivo; estas variaciones influyen en los factores correctores que a su vez van a influir en la evolución de la temperatura media del hormigón, el calor intercambiado, la energía almacenada y en la temperatura de salida del fluido HTF.

En la figura 79 se va a observar cómo varía la temperatura media del hormigón; el flujo de calor intercambiado entre el fluido térmico y el bloque de hormigón que rodea a un solo tubo, en un proceso de carga (el proceso de descarga es similar; la energía almacenada por el bloque de hormigón que rodea a un solo tubo (la energía liberada en el proceso de descarga es similar) y la temperatura de salida del fluido térmico en el proceso de carga, al variar la diferencia de temperaturas entre el bloque de hormigón y el fluido térmico.

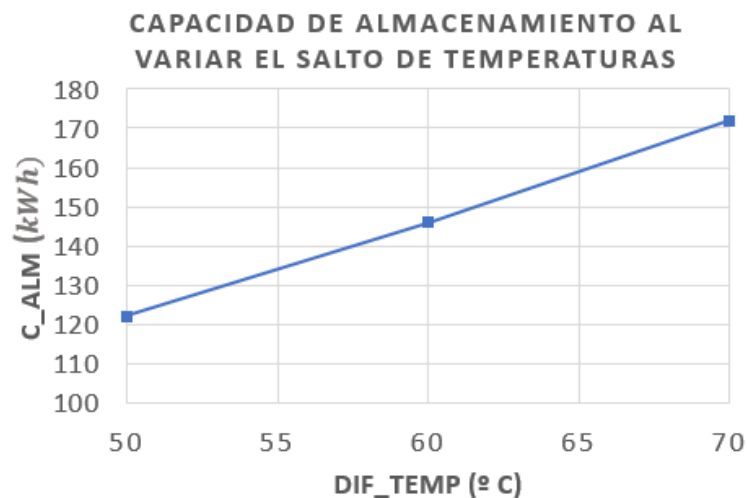


**Figura 79.** Evolución de temperaturas y energías al variar la temperatura de entrada del fluido térmico.

De la figura 79 se obtienen las siguientes conclusiones:

- ❖ Si el fluido térmico proviene de la instalación solar (a la que se conecta en paralelo) a mayor temperatura, el salto de temperaturas aumenta, por lo tanto, hormigón va a llegar a una temperatura mayor, este va a alcanzando temperaturas más altas, y el tiempo de carga es algo más lento, aunque este parámetro varía ligeramente.
- ❖ El flujo calor transferido al hormigón es mayor si el fluido térmico se encuentra a temperaturas superiores.
- ❖ Si el fluido térmico se encuentra a una mayor temperatura, va a transferir esta energía al hormigón, por lo tanto, se va a poder almacenar más cantidad de energía y en consecuencia la capacidad de almacenamiento del sistema completo (40 tubos) va a aumentar.

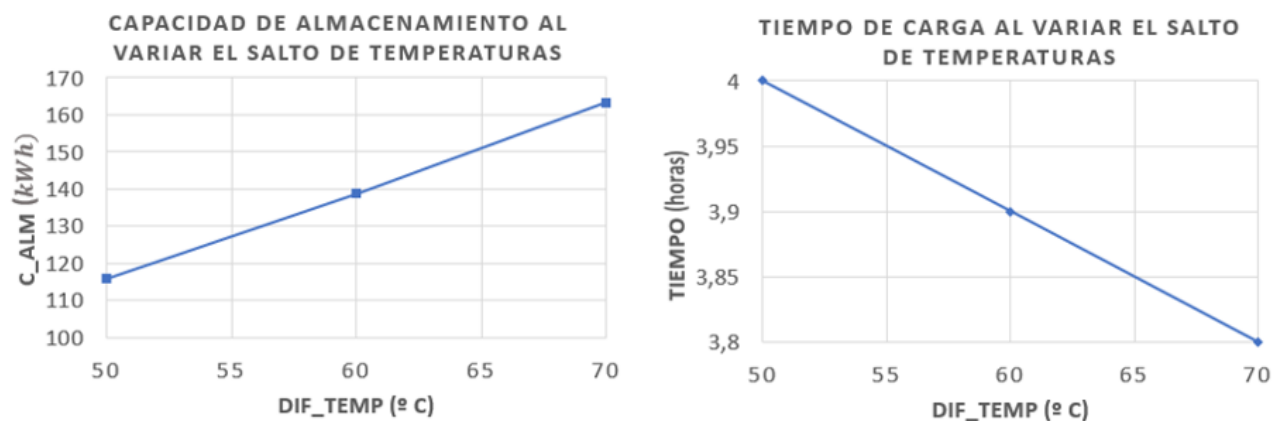
En la figura 80 se puede observar gráficamente cómo varía la capacidad de almacenamiento al variar el salto de temperaturas, considerando una capacidad de almacenamiento del 100%.



**Figura 80.** Capacidad de almacenamiento al variar el salto de temperaturas.

**Si se considera el tiempo de carga el tiempo que tarda en almacenarse el 95 % de la capacidad de almacenamiento.**

El tiempo de carga al sistema y la capacidad de almacenamiento en función del salto de temperaturas, varía tal y como se puede observar en la figura 81, si se considera que solo se puede almacenar el 95% de la energía total que podría almacenarse por el sistema completo, y el tiempo de carga es aquel que tarda en almacenarse el 95 % de la energía que se podría almacenar. El tiempo de carga y descarga disminuye levemente y la capacidad de almacenamiento aumenta si el fluido térmico proviene del campo solar a una temperatura más alta



**Figura 81.** Capacidad de almacenamiento y tiempo de carga si se almacena el 95 %.

Si se considera el tiempo de carga el tiempo que tarda en almacenarse el 90 % de la capacidad de almacenamiento.

En la figura 82 se puede observar cómo varía el tiempo de carga y la capacidad de almacenamiento, si solo se almacena el 90 % de la energía que podría almacenarse.

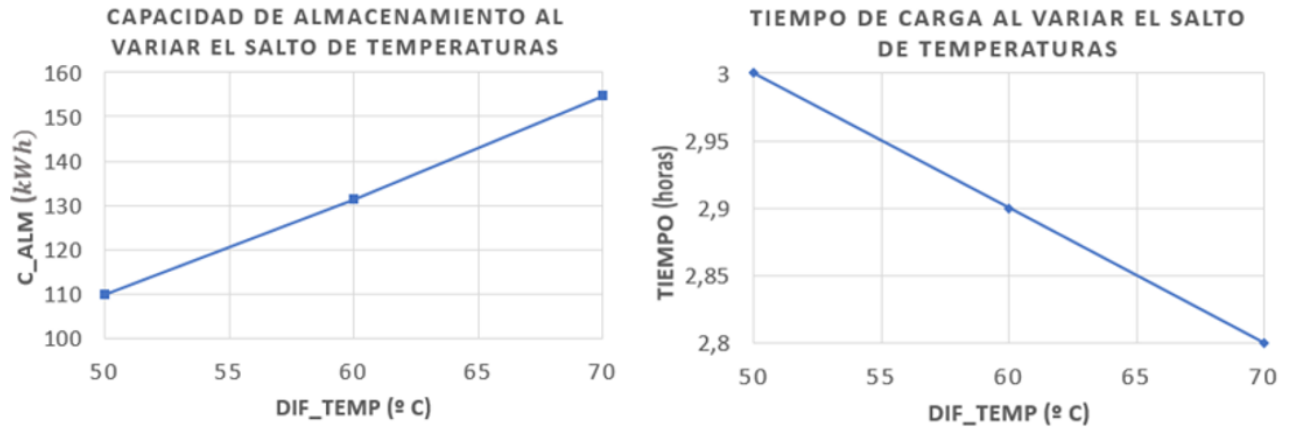


Figura 82. Capacidad de almacenamiento y tiempo de carga si se almacena el 90%.

### 5.2.2.7 Análisis al variar el tipo hormigón utilizado

Al variar el tipo hormigón utilizado las propiedades del fluido térmico no varían, luego el Reynolds, Nusselt, y Prandtl, no varían.

Del mismo modo, al no variar la geometría del sistema, ni ningún otro parámetro, los factores de corrección no van a variar, ni la longitud característica, ni los parámetros adimensionales  $\eta$  y  $A_r$ . Sin embargo, la evolución de la temperatura media de hormigón, el flujo de calor intercambiado, la energía almacenada en un periodo de tiempo y la evolución la temperatura de salida del fluido de transferencia térmica; van a variar, ya que la densidad y el calor específico del hormigón varían según la mezcla de hormigón que se elija como medio de almacenamiento.

Para realizar esta comparación se ha utilizado diferentes tipos de hormigón probados y utilizados en otros sistemas de almacenamiento. Se compara la evolución de la temperatura en un proceso de carga y descarga, el flujo de calor intercambiado en un proceso de carga, la energía almacenada por el bloque de hormigón que rodea un solo tubo, en un proceso de carga al sistema y la evolución de la temperatura de salida del fluido térmico; utilizando hormigón Heatcrete, utilizando un hormigón reforzado con fibras de polietileno, el hormigón utilizado en los experimentos del Instituto Alemán Aeroespacial (DLR), y el hormigón de alta temperatura citado en el artículo 28.

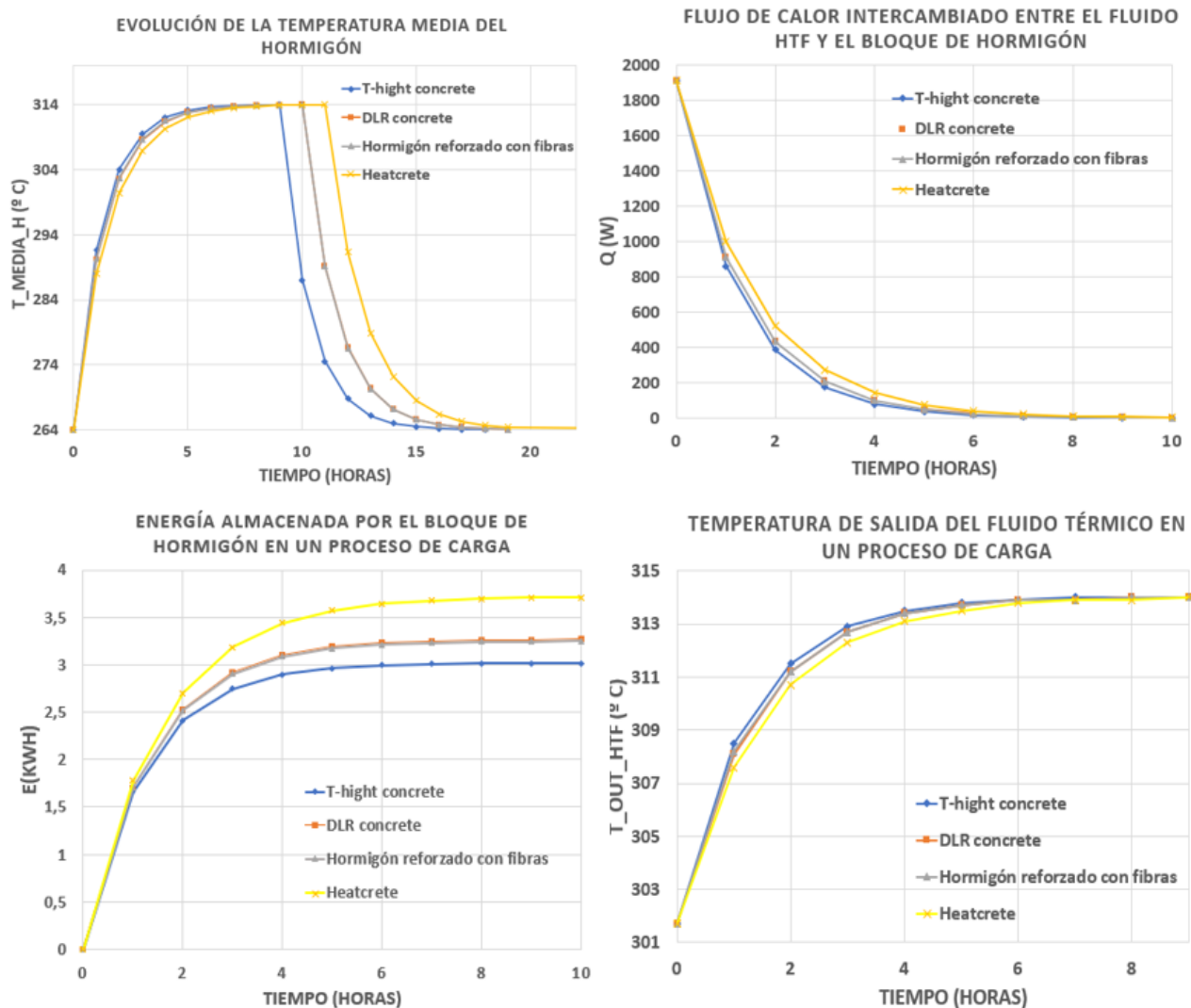
En la tabla 23 se muestran las propiedades de los distintos tipos de hormigón que se han utilizado para realizar la comparación:

Propiedades	Hormigón de alta temperatura [28]	Hormigón DLR [20]	Hormigón con fibras de polietileno [17]	Heatcrete a 340 °C [20]
Cp (J/kg K)	974	1056	1050	1142,13
$\rho$ (kg/ m <sup>3</sup> )	2250	2250	2250	2364

Tabla 22. Propiedades de las distintas mezclas utilizadas para realizar la comparación.

A continuación, en la figura 83 se presenta la evolución de la temperatura media del hormigón, la evolución del flujo de calor intercambiado entre el fluido térmico y el bloque de hormigón (que rodea a un solo tubo), la energía acumulada en el bloque de hormigón (que rodea a un solo tubo) y la evolución de la temperatura de salida del fluido térmico.





**Figura 83.** Evolución de temperaturas y energías al variar el material de almacenamiento.

De la figura 83 se pueden sacar las siguientes conclusiones al variar la mezcla de hormigón que se utiliza:

- ❖ A mayor calor específico mayor energía se va a poder almacenar en el bloque de hormigón que rodea a un solo tubo, por lo tanto, mayor capacidad total va a tener el sistema. En la tabla 24, se muestra el aumento de capacidad de almacenamiento al utilizar un sistema como este de 40 tubos, y variar el tipo de hormigón utilizado.

Sistema de 40 tubos	Hormigón de alta temperatura	Hormigón DLR	Hormigón con fibras de polietileno	Heatcrete a 340 ° C
<b>Capacidad de almacenamiento</b>	122 kWh	130,8 kWh	130 kWh	148,4 kWh

**Tabla 23.** Capacidad de almacenamiento en función del hormigón utilizado.

- ❖ En cuanto, a la evolución de la temperatura media del hormigón, puede observarse que a menor calor específico y a menor densidad más rápido se carga el sistema.
- ❖ En cuanto a la evolución del flujo de calor intercambiado entre el fluido térmico y el bloque de hormigón la respuesta es más lenta si el calor específico y la densidad del hormigón son mayores.
- ❖ La temperatura de salida del fluido térmico se alcanza de manera más lenta a mayor calor específico y

mayor densidad del hormigón.

- ❖ Para aumentar la capacidad de almacenamiento es necesario utilizar un hormigón que posea un calor específico alto.

**Si se considera el tiempo de carga, el tiempo que tarda en almacenarse el 95 % de la energía que se podría almacenar:**

En la tabla 25 se muestra como varía el tiempo de carga para un sistema de 40 tubos, en función del tipo de hormigón elegido, si se considera que se almacena el 95 % de la energía que podría almacenar el sistema de almacenamiento completo.

Sistema de 40 tubos	Hormigón de alta temperatura	Hormigón DLR	Hormigón con fibras de polietileno	Heatcrete a 340 ° C
Tiempo de carga	4 horas	4,1 horas	4,1 horas	4,5 horas

**Tabla 24.** Tiempo de carga al considerar que se almacena el 95 % de su capacidad de almacenamiento.

### 5.2.2.8 Análisis al variar el fluido térmico utilizado

Como se puede ver en la tabla 26, que recoge las propiedades de los fluidos térmicos más utilizados, se observa que el Therminol VP1 y el Dowtherm Q poseen propiedades termofísicas similares entre sí, y estas varían ligeramente si las comparamos con las propiedades del fluido térmico Syltherm 800.

La densidad, la conductividad térmica y el calor específico del Therminol VP1 y del Dowtherm Q (que posee propiedades muy similares a Therminol VP1) es mayor que la del Sytherm 800. En cuanto a la viscosidad el Therminol VP1 y del Dowtherm Q es menor respecto a la del Sytherm 800.

Propiedades	Syltherm 800	Therminol VP1	Dowtherm Q
<b>Cp (J/kg K)</b>	$1,7 \cdot T - 1575$	$2,7379 \cdot T - 1495,8$	$3,0092 \cdot T - 1599,4$
<b><math>\rho</math> (kg/ m<sup>3</sup>)</b>	$6,023 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 7,945 \cdot 10^{-2} \cdot T + 9,587 \cdot 10^2$	$-0,894 \cdot T + 1086$	$-0,756 \cdot T + 980,57$
<b><math>\mu</math> (Pa·s)</b>	$1,416 \cdot 10^{-2} \cdot T^4 - 1,659 \cdot 10^{-9} \cdot T^3 + 7,178 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 - 1,405 \cdot 10^{-4} \cdot T + 1,142 \cdot 10^{-2}$	$0,121 \cdot T^{-1,089}$	$0,0032 \cdot e^{-0,01 \cdot T}$
<b>K (W/m K)</b>	$-1,905 \cdot 10^{-4} \cdot T + 0,14$	$-1 \cdot 10^{-4} \cdot T + 0,141$	$-1 \cdot 10^{-4} \cdot T + 0,1257$

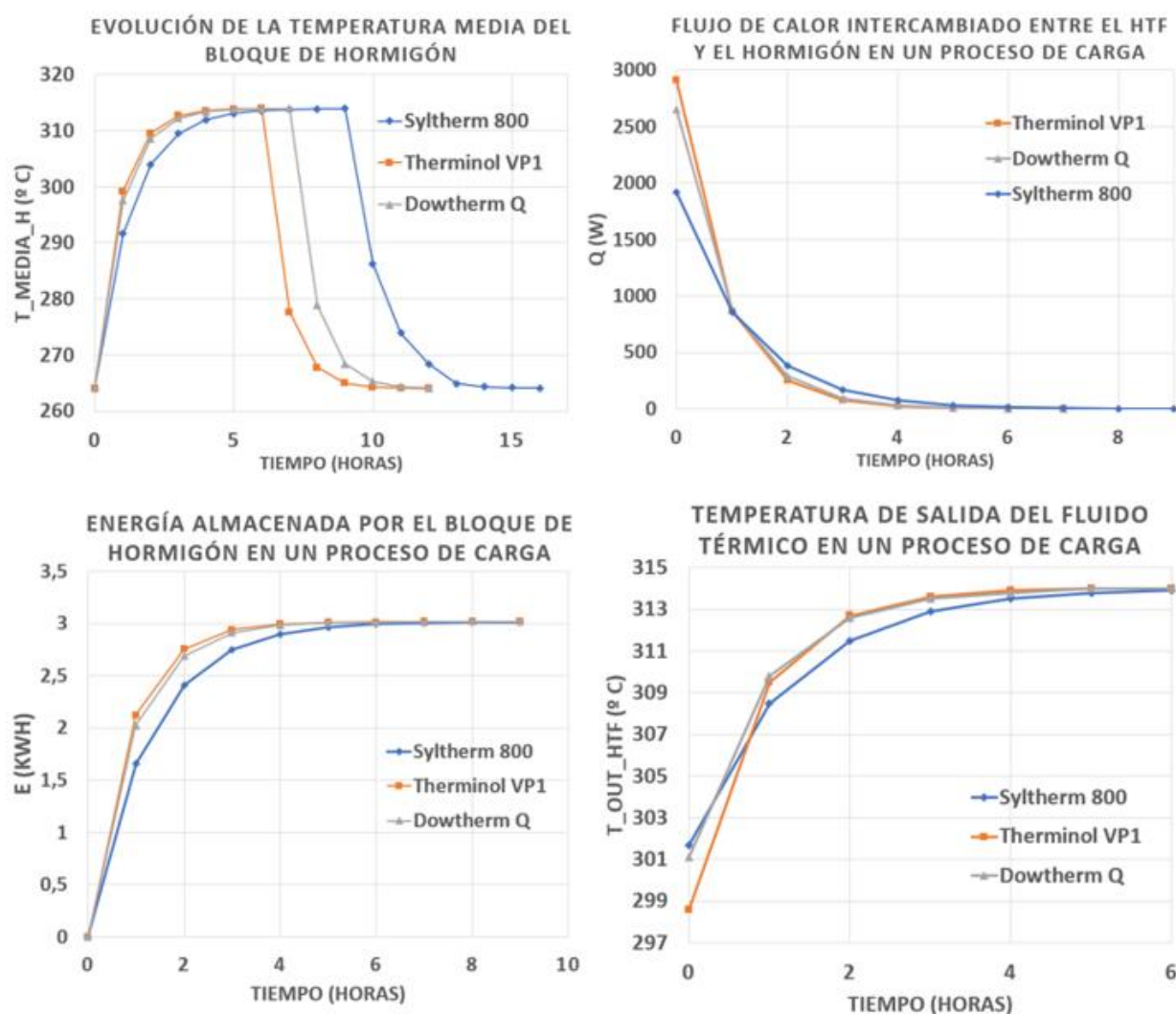
**Tabla 25 .** Propiedades de los distintos fluidos utilizados para realizar la comparación

Al variar las propiedades termofísicas del fluido térmico, varía el número de Reynolds (este depende de la velocidad del fluido térmico y de la viscosidad); el Prandtl también va a variar ya que depende de la viscosidad, el calor específico y la conductividad térmica; el Nusselt también va a sufrir ciertas modificaciones, y como consecuencia el coeficiente de transferencia de calor convectivo (h) también.

Al variar el número de Reynolds y el coeficiente de transferencia de calor convectivo van a variar los factores correctores utilizados, esto va a influir directamente en la evolución de la temperatura media del hormigón, en el flujo de calor intercambiado entre el fluido HTF y el hormigón en un proceso de carga (similar al descarga), en la energía almacenada por el bloque de hormigón que rodea a un solo tubo (la energía liberada en un proceso de descarga es similar) y por lo tanto en la capacidad de almacenamiento total del sistema. A su vez también variará la temperatura de salida del fluido térmico en un proceso de carga.

De la figura 84, en la que se muestra la evolución de la temperatura media del hormigón, el flujo intercambiado en un proceso de carga entre el fluido térmico y el hormigón, y la evolución de la energía almacenada en un proceso de carga (similar al de descarga), y la temperatura de salida del fluido térmico en un proceso de carga; se obtienen las siguientes conclusiones de diseño:

- ❖ El tiempo de carga y de descarga es menor al utilizar Dowtherm Q y Therminol VP1 ya que el Reynolds aumenta porque la densidad del fluido térmico Dowtherm Q y Therminol VP1 es mayor.
- ❖ Al utilizar Dowtherm Q y Therminol VP1 el flujo de calor intercambiado entre el fluido térmico y el bloque de hormigón que rodea a un solo tubo, es mayor al inicio (en las primeras horas), sin embargo, en las últimas horas se transfiere menor cantidad de calor.
- ❖ El tiempo que tarda el bloque de hormigón en almacenar energía térmica es mayor cuando se utiliza Syltherm 800, pero se almacena la misma energía al utilizar un fluido térmico u otro, aunque se llegue a alcanzar la capacidad de almacenamiento antes al usar Dowtherm Q y Therminol VP1.
- ❖ En cuanto a la temperatura de salida del fluido térmico en un proceso de carga, se alcanzan antes los 314 ° C en la carga, utilizando Dowtherm Q y Therminol VP1, ya que las curvas son más rápidas al usar estos fluidos de transferencia térmica.



**Figura 84.** Evolución de temperaturas y energías al variar el fluido térmico.

En la tabla 27 se registra cómo varía el tiempo de carga al utilizar un fluido térmico u otro. Se tiene en cuenta que se considera el tiempo de carga, como el tiempo que tarda en almacenarse el 95 % de la energía total que puede ser almacenada por el sistema.

Propiedades	Syltherm 800	Therminol VP1	Dowtherm Q
Tiempo de carga	4 h	2,7 h	3 h

**Tabla 26.** Tiempo de carga estimado, utilizando fluidos térmicos distintos.

### 5.2.2.9 Análisis al variar la resistencia de contacto entre la tubería y el bloque de hormigón

Entre el tubo y el hormigón es necesario modelar una resistencia de contacto adicional, ya que entre hormigón y el tubo inmerso en él, existe un hueco de aire cuya conductividad térmica es muy baja, que permite que se cree una resistencia de contacto. Esta se supone en el artículo 28 de  $0,0025 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ .

Al variar la resistencia de contacto varía el factor corrector  $f_{corr2}$ , y al variar este parámetro varía la evolución de la temperatura media del hormigón, el flujo intercambiado entre el fluido térmico y el hormigón, la energía almacenada por el bloque de hormigón y la evolución de la temperatura de salida del fluido térmico.

En este análisis se considera una resistencia de contacto de  $0,0025 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ , para el caso base (mostrado en azul en las gráficas; de  $0,004 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$  (se muestra en naranja), y de  $0,006 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$  (se muestra en color gris).

De la figura 85, se obtienen las siguientes conclusiones al aumentar la resistencia de contacto entre el bloque de hormigón y la tubería inmersa en el mismo:

- ❖ El tiempo de carga/descarga aumenta ligeramente.
- ❖ El flujo de calor intercambiado entre el fluido térmico y el hormigón disminuye.
- ❖ La energía almacenada por el bloque de hormigón que rodea a un solo tubo no varía, pero el tiempo en llegar a almacenarse dicha energía aumenta al aumentar la resistencia de contacto.

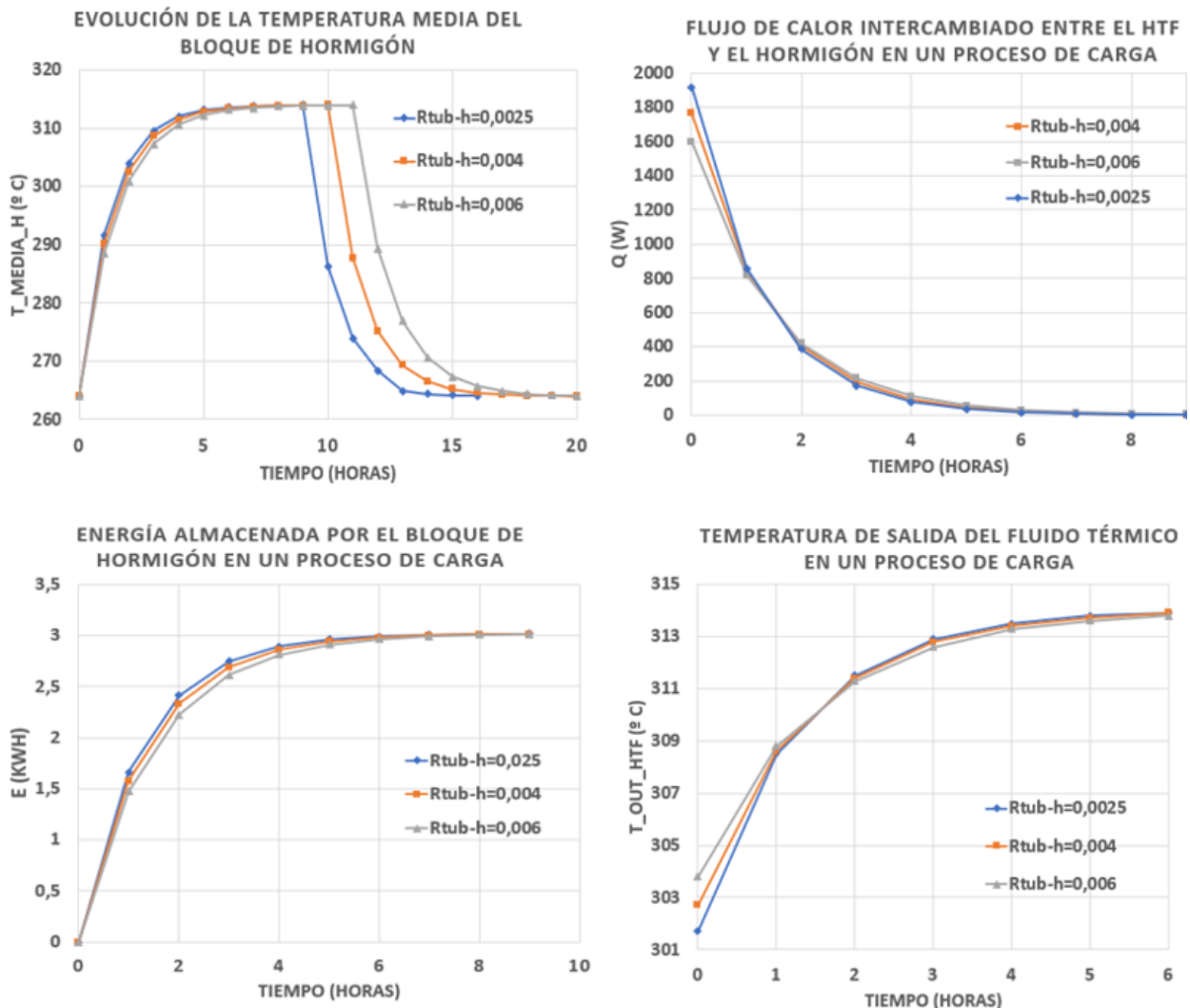
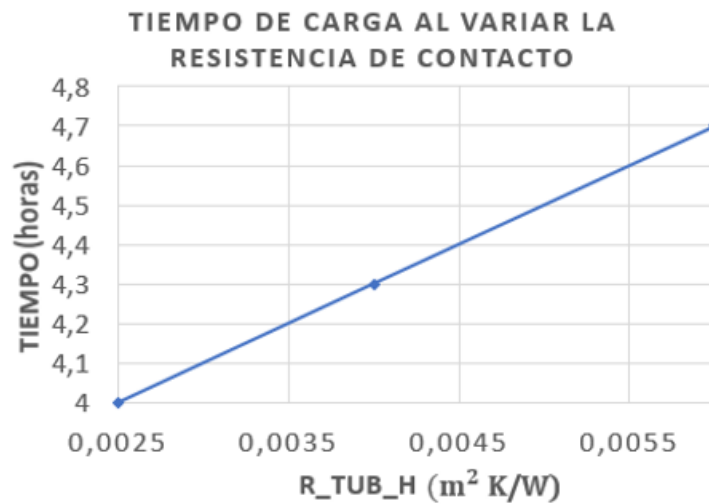


Figura 85. Evolución de temperaturas y energías variar la resistencia de contacto.

El tiempo de carga del sistema si se considera que el sistema se carga al 95% de la capacidad de almacenamiento total.

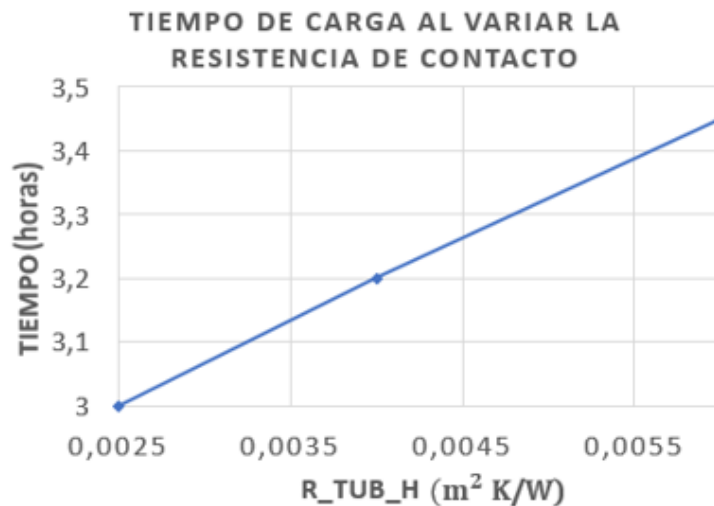
El tiempo de carga al sistema aumenta al aumentar la resistencia de contacto tal y como puede observarse en la figura 86, siendo de 4 horas si la resistencia de contacto es de  $0,0025 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ , siendo de 4,3 horas si la resistencia de contacto es de  $0,004 \text{ m}^2 \text{ K/W}$  y de 4,7 horas si la resistencia de contacto es de  $0,006 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ .



**Figura 86.** Tiempo de carga si se considera que el sistema almacena el 95 %.

**El tiempo de carga del sistema si se considera que el sistema se carga al 90% de la capacidad de almacenamiento total.**

El tiempo de carga del sistema si se considera que el sistema se carga al 90 % de la capacidad de almacenamiento aumenta al aumentar la resistencia de contacto tal y como puede observarse en la figura 87. Siendo de 3 horas si la resistencia de contacto es de  $0,0025 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ , siendo de 3,2 horas si la resistencia de contacto es de  $0,004 \text{ m}^2 \text{ K/W}$  y de 3,45 horas si la resistencia de contacto es de  $0,006 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ .



**Figura 87.** Tiempo de carga al sistema si se considera que este se carga al 90 % de su capacidad.

### 5.2.3 Conclusiones de diseño

A continuación, en la tabla 28 se puede observar un cuadro resumen que recoge las principales conclusiones de diseño obtenidas en el análisis paramétrico realizado en el apartado 5.2.2.

En la tabla 28 se puede observar de un vistazo qué ocurre si variamos un parámetro de diseño (la velocidad del fluido térmico, la distancia entre los tubos, la resistencia de contacto entre el tubo y el bloque de hormigón que

lo rodea, el diámetro de los tubos, la longitud del bloque de hormigón, el rango de temperaturas de trabajo, el tipo de hormigón que se utiliza y el fluido térmico que se ha elegido) y cómo variar estos parámetros afecta en las demás variables y en las curvas de interés.

Parámetro que varía	Cómo influye en los demás parámetros, y en las curvas de interés					
↑ $V_{HTF}$ (m/s)	= $V_h, L_c, A_r, \eta$	↑ Nu, Re	= $V_t$	= E	↓ Tiempo de carga	= Capacidad de almacenamiento
↑ $d_o$ ( $N_{tubos}, constante$ )	↑ $V_h, L_c, \eta$ ; ↓ $A_r$	= Nu, Re	↑ $V_t$	↑ E	↑ Tiempo de carga	↑ Capacidad de almacenamiento
↑ $d_o, N_{tubos}$ ↓	↑ $V_h, L_c, \eta$ ; ↓ $A_r$	= Nu, Re	= $V_t$	↑ E	↑ Tiempo de carga	= Capacidad de almacenamiento
↑ Diámetro de los tubos	↓ $V_h, L_c, \eta$ ; ↑ $A_r$	↑ Nu, Re	↓ $V_t$	↓ E	↓ Tiempo de carga	↓ Capacidad de almacenamiento
↑ L	↑ $V_h, A_r$ ; = $L_c, \eta$	= Nu, Re	↑ $V_t$	↑ E	↑ Tiempo de carga	↑ Capacidad de almacenamiento
↑ $\Delta T$ ( $T_{inf}$ )	= $V_h, L_c, A_r, \eta$	↑ Nu, Re	= $V_t$	↑ E	↓ Tiempo de carga	↑ Capacidad de almacenamiento
Hormigón	↑ Cp	= Nu, Re	= $V_t$	↑ E	↑ Tiempo de carga	↑ Capacidad de almacenamiento
Fluido térmico utilizado	↑ Cp, $\rho, k$ ; ↓ $\mu$	↓ $V_{htf}$ ; Nu, Re	= $V_t$	= E	↓ Tiempo de carga	= Capacidad de almacenamiento
↑ $R_{tub-h}$	-	-	-	-	↑ Tiempo de carga	= Capacidad de almacenamiento

**Tabla 27.** Conclusiones de diseño

Siendo:

- ❖  $V_h$ : El volumen del prisma hexagonal que rodea a un solo tubo.
- ❖  $V_t$ : El volumen total del módulo de hormigón.

Cabe destacar que las variables más críticas son: la velocidad que circula por un tubo, el número de tubos que se utilizan, la distancia de centro a centro entre los tubos, la longitud del sistema de almacenamiento y el tipo de hormigón utilizado como medio de almacenamiento. La resistencia entre el hormigón y el tubo influye en el tiempo de carga, lo ideal es que sea lo más pequeña posible.

El fluido térmico que se utiliza y el tubo elegido (diámetro exterior e interior del mismo) no influyen de forma tan drástica a la hora de diseñar el sistema de almacenamiento.

- ❖ La velocidad de entrada del fluido térmico suele ser del orden de 0,2 m/s o 0,3 m/s; al aumentar el valor de esta, aumenta el caudal másico que circula por los tubos, por lo tanto, el tiempo de carga disminuye. Es decir, al aumentar la velocidad del fluido térmico en un 50 % (de 0,2 m/s a 0,3 m/s), el caudal másico del fluido térmico aumenta un 50% y el tiempo de carga disminuye en un 18 % (considerando el tiempo de carga como el tiempo que tarda en almacenarse el 95 % de la energía total que podría ser almacenada).
- ❖ La distancia entre los tubos suele ser del orden de varios centímetros, en el caso base se ha supuesto de 11 cm. Al aumentar este valor un 9,1 % si mantenemos el número de tubos constante, va a aumentar el volumen de hormigón que rodea a un solo tubo, y en consecuencia el volumen total aumenta un 9,1 %, es decir, aumenta la capacidad de almacenamiento del sistema en un 20 %. Al ser mayor el volumen, el tiempo de carga va a aumentar en un 15 % ya que se calienta un volumen mayor.
- ❖ Al aumentar la distancia entre los tubos un 9,1 %, si el volumen total se mantiene invariable, el número de tubos va a disminuir un 15 %, es decir para un sistema en el que los tubos se separan 11 cm caben 40 tubos, para un sistema en el que los tubos se separan 12 cm caben 34 tubos, para un sistema en el que los tubos se separan 13 cm caben 28 tubos. La capacidad de almacenamiento total se mantiene invariable, y el tiempo de carga aumenta un 15% (al aumentar un 9,1 % la distancia entre los tubos) ya que el volumen del prisma hexagonal que rodea a un solo tubo es mayor.
- ❖ Aumentar el diámetro de los tubos un 17,37%, manteniendo la velocidad que circula por estos constante permite que el caudal que circule por los mismos sea mayor un 36 %, por otro lado, el tiempo de carga es menor un 2 %. Por otra parte, el volumen del prisma hexagonal que rodea a un solo tubo es algo menor por lo tanto la capacidad de almacenamiento disminuye ligeramente un 3 %. Se ha realizado el análisis eligiendo un tubo de 0,0213 m de diámetro interior y otro de 0,025 m de diámetro interior, se

ha probado con otros tubos que no se han incluido en el análisis ya que elegir un tubo u otro no influye de forma relevante en el comportamiento del sistema.

- ❖ Al aumentar la longitud del bloque de hormigón, aumenta el volumen de hormigón que rodea a un solo tubo, y en consecuencia el volumen total del sistema; por lo tanto, aumenta la energía almacenada por un solo tubo y la capacidad de almacenamiento total. Cabe destacar que, al aumentar la longitud del bloque de hormigón de 5 m a 10 m, se duplica la capacidad de almacenamiento, sin embargo, el tiempo de carga aumenta, pero no se duplica, siendo este de 3,6 horas si la longitud es de 5 m y de 4 horas si la longitud es de 10 m, teniendo en cuenta que se considera como tiempo de carga el tiempo que tarda en almacenarse el 95 % de la energía que se podría almacenar, es decir el tiempo de carga aumenta un 10% al duplicar la longitud del módulo de hormigón que rodea a un solo tubo,
- ❖ Si aumenta la diferencia de temperaturas entre el fluido térmico a la entrada y el hormigón, es decir, si se supone que el fluido térmico proviene del campo solar a una temperatura mayor, la energía almacenada por el hormigón aumenta, y el tiempo de carga disminuye. Si el fluido térmico proviene del campo solar a 10 ° C más (es decir si se aumenta la temperatura del fluido térmico un 3,1 %), se almacena por un solo tubo 3,54 kWh, teniendo en cuenta que en el caso base el prisma hexagonal que rodea a un solo tubo almacena 3 kWh, es decir la capacidad de almacenamiento aumenta un 18 % y el tiempo de carga disminuye un 2,5 %. Es decir, el sistema total compuesto por 40 tubos en el caso base tiene una capacidad de almacenamiento de 122 kWh y al aumentar la temperatura de entrada del fluido térmico 10 °C la capacidad de almacenamiento aumenta a 144 kWh.
- ❖ Al utilizar un tipo de hormigón con un calor específico mayor aumenta el tiempo de carga, pero también lo hace la capacidad de almacenamiento.
- ❖ Aumentar la resistencia de contacto entre el tubo y el hormigón un 60 % aumenta el tiempo de carga del sistema un 17 % (teniendo en cuenta que se considera el tiempo de carga/descarga al sistema el tiempo que tarda en almacenarse o liberarse el 95 % de la energía almacenada por el bloque de hormigón).
- ❖ Si se eligen fluidos térmicos que posean un alto calor específico, alta conductividad térmica, y baja viscosidad el tiempo de carga será menor.

### 5.3 Prediseño de un caso práctico

Un proyecto que posee una localización idónea para la producción de calor mediante la generación solar de concentración desea automatizar la producción de vapor para suministrarla a una fábrica de refrescos, para ello se necesita un sistema de almacenamiento térmico en hormigón conectado en paralelo a un campo solar (colectores cilindro-parabólicos), el sistema de almacenamiento se conecta a su vez a una caldera y a una bomba que impulsa el aceite térmico.

Se pide el sistema de almacenamiento que se va a instalar en la planta, este debe tener una capacidad de 500 kWh, el tiempo de carga del sistema de almacenamiento debe ser aproximadamente de 5 horas, el fluido térmico proviene de la instalación solar a 324 °C y el hormigón se encuentra a una temperatura inicial de 264 °C.

En cuanto a la temperatura de entrada del fluido térmico, esta se ha analizado en el prediseño del sistema para obtener resultados acerca de su influencia en el sistema de almacenamiento térmico, sin embargo, la temperatura a la que esta procede del campo solar se supone un dato, ya que en este trabajo fin de máster no se ha simulado el funcionamiento de los colectores cilindro-parabólicos. Se va a suponer una diferencia de temperaturas de 60 °C.

Es necesario tener en cuenta que los módulos de almacenamiento se van a transportar en contenedores, por lo tanto, hay que limitar la longitud de estos, teniendo en cuenta que una vez que se haya transportado a la planta, estos se colocaran en serie o paralelo según convenga.

#### 5.3.1 Datos de entrada.

Conociendo cómo varían los parámetros de entrada en las curvas de interés, en el tiempo de carga y de descarga, y en la capacidad de almacenamiento se suponen los siguientes parámetros de entrada, se han ido variando y ajustándose al tiempo de carga requerido, para ello se ha variado la velocidad del fluido térmico desde 0,1 m/s

a 0,2 m/s, y la distancia entre los tubos hasta obtener un tiempo de carga de 5 horas.

**Para la simulación se han fijado los siguientes datos:**

- ❖ Para la simulación se ha supuesto un sistema equivalente de 10 metros de longitud (dos módulos de 5 metros conectados en serie), este se supone así en base al análisis paramétrico realizado en el apartado 5.2, ya que se simula el sistema equivalente, aunque realmente se trate de submódulos de 5 metros de longitud conectados en serie para que se puedan enviar en camiones.
- ❖ El diámetro interior y exterior se supone similar al caso base siendo  $d_i=0,0213$  m y  $d_{ext}=0,0269$  m.
- ❖ Fluido térmico usado: Therminol VP1, se ha utilizado este ya que los tiempos de carga al sistema son menores.
- ❖ Hormigón utilizado: Heatcrete, se utiliza este ya que permite una capacidad de almacenamiento al sistema mayor que utilizando otro tipo de hormigón que se haya estudiado.
- ❖ La resistencia de contacto entre la tubería y el bloque de hormigón se supone de  $0,0025 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ , tal y como se indica en el artículo 28 (de las referencias) y tal y como se ha supuesto en el caso base del análisis paramétrico.

La capacidad de almacenamiento se indica en las especificaciones de diseño que debe ser de 500 kWh, sin embargo, al tener en cuenta que el tiempo de que carga se considera el tiempo transcurrido para almacenar el 95 % de la energía, se va a realizar el pre- dimensionamiento, sobredimensionando el sistema es decir se considera un sistema con una capacidad de almacenamiento de 526 kWh, por lo tanto, se mide el tiempo de carga cuando se ha almacenado 500 kWh.

Sabiendo que la capacidad de almacenamiento del sistema puede calcularse a partir de la siguiente expresión, y esta se fija en 526 kWh, de la siguiente ecuación se obtiene la masa del hormigón. Se ha adaptado el código EES añadiendo estas ecuaciones, con el objetivo de obtener el número de tubos necesarios.

$$Q_c^{stg} = M_c \cdot C_{p,c} \cdot \Delta T$$

El número de tubos se puede obtener de forma sencilla a partir de la siguiente expresión:

$$M_c = \rho_c \cdot V_h \cdot N_{tubos}$$

Se ha ajustado la velocidad del fluido térmico para obtener el tiempo de carga que se requiere y se ha ajustado la distancia entre los tubos también. Finalmente se ha tomado como velocidad del fluido térmico 0,1513 m/s para esta velocidad se obtiene un caudal másico de 0,04582 kg/s en cada tubo; para ello se ha variado la velocidad del fluido térmico desde 0,1 m/s a 0,2 m/s, y la distancia entre los tubos hasta obtener un tiempo de carga de 5 horas.

La distancia entre los tubos finalmente se ha tomado de  $d_o=0,125$  m.

### 5.3.2 Sistema que cumple con las especificaciones de diseño:

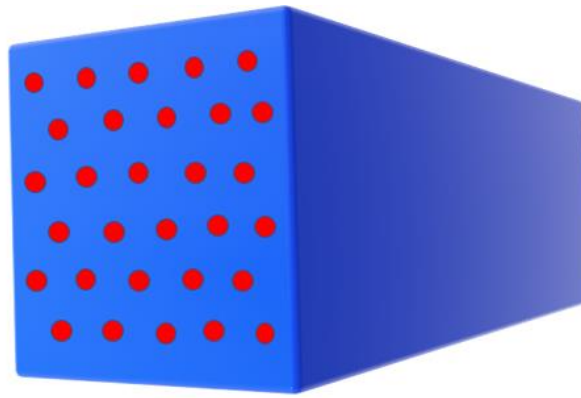
Dadas unas especificaciones de diseño: una capacidad de almacenamiento determinada de 500 kWh y el tiempo de carga de 5 horas, conociendo la temperatura a la que proviene el fluido térmico del campo solar (364 °C) y la temperatura inicial de hormigón (264 °C), se puede obtener un sistema que cumpla con las especificaciones de diseño.

Un sistema que cumple con los requisitos de diseño requeridos (tiempo de carga de 5 horas y capacidad de almacenamiento de 500 kWh) es un sistema de 90 tubos, cuya masa total son 27,63 toneladas. Este sistema se puede dividir en 6 submódulos, cada uno de ellos posee 30 tubos y 5 metros de longitud, el peso de cada uno es de 4,6 toneladas, estos seis módulos se conectan de dos en dos en serie, formando tres bloques que se conectan a su vez en paralelo.

En la figura 88 se puede observar un bloque de los seis que conforman el sistema equivalente, la dimensión de cada submódulo de hormigón es de  $0,625 \times 0,625 \times 5 \text{ m}^3$ .

En la figura 89 se muestra un esquema de la disposición de los módulos del sistema de almacenamiento que se conectan de dos en dos en serie y estos tres bloques se conectan en paralelo.





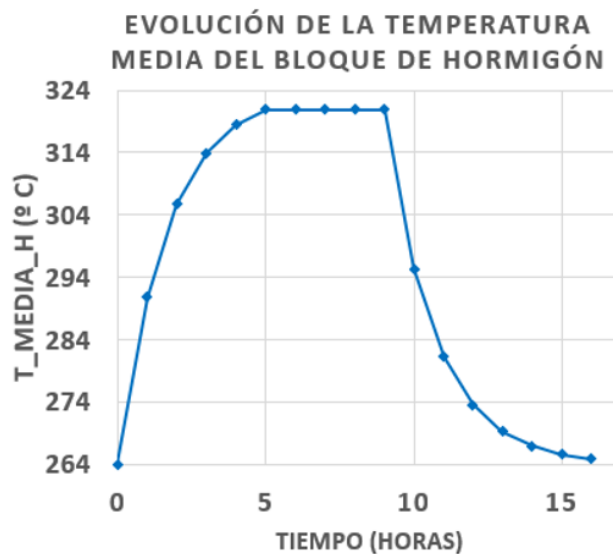
**Figura 88.** Submódulo de hormigón utilizado para el prediseño del caso práctico.



**Figura 89.** Disposición de los módulos del sistema de almacenamiento.

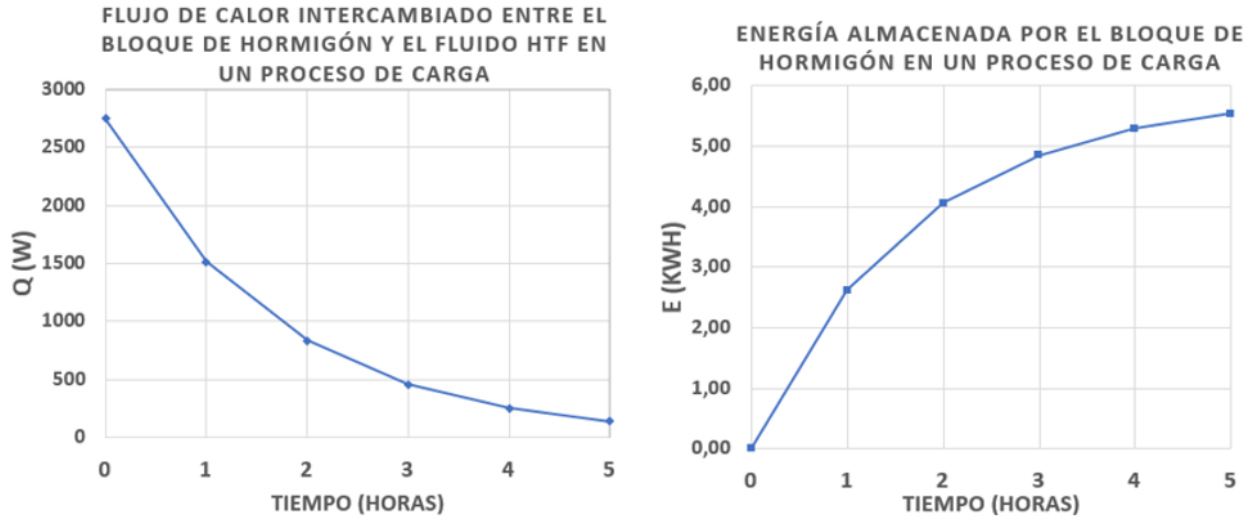
En la figura 90 se muestra la evolución de la temperatura media del bloque de hormigón del sistema equivalente. Suponemos que el sistema se carga cuando se ha almacenado el 95 % de la energía máxima que se podría almacenar en este caso se ha sobredimensionado el sistema para obtener resultados más precisos, es decir se supone que el máximo que se puede almacenar es 526 kWh, el 95% de este valor es 500 kWh, la capacidad de almacenamiento requerida.

En la carga se supone un salto de temperaturas de 60 °C, la temperatura de entrada del fluido térmico es de 324 °C, y el hormigón se encuentra a una temperatura inicial de 264 °C. En la descarga se supone un salto de temperaturas menor, ya que la temperatura máxima alcanzada por el hormigón es de 320,9 °C.



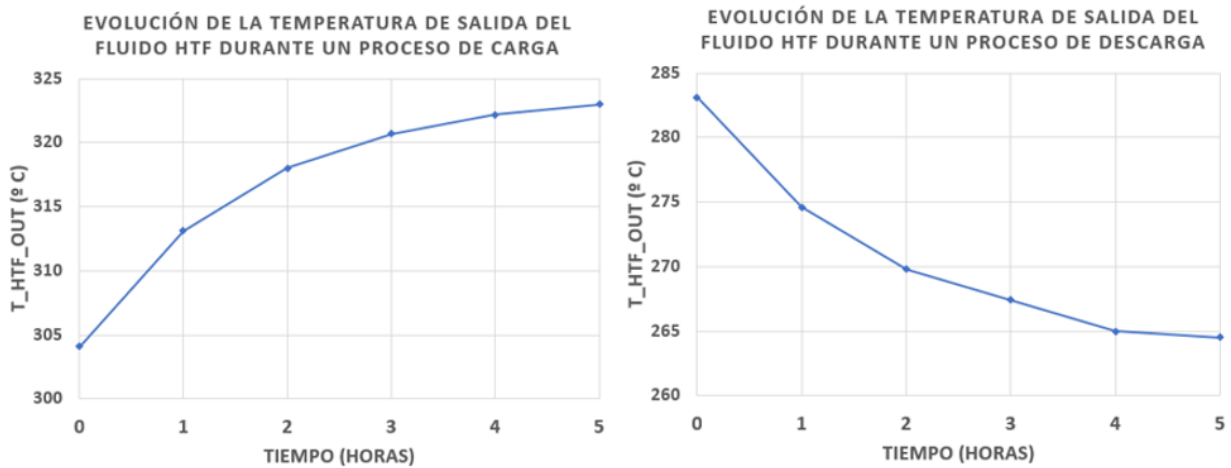
**Figura 90.** Evolución de la temperatura media del hormigón en el caso práctico.

En la figura 91 se muestra la evolución del flujo intercambiado entre el fluido térmico y el prisma hexagonal de hormigón que rodea a un solo tubo, durante el proceso de carga, y la energía almacenada por el bloque de hormigón (que rodea a un solo tubo). El flujo intercambiado entre el fluido térmico y el hormigón en un proceso de descarga es similar, y la energía liberada por el módulo de hormigón es similar a la energía almacenada, ya que no existen pérdidas en el sistema.



**Figura 91.** Flujo de calor intercambiado y energía almacenada por el bloque de hormigón.

En la figura 92 se muestra la evolución de la temperatura de salida del fluido térmico (Therminol VP1) durante el proceso de carga y de descarga al sistema.



**Figura 92.** Evolución de la temperatura de salida del HTF durante el proceso de carga y descarga.

## 6. CONCLUSIONES Y RESUMEN

---

A lo largo de este trabajo final de máster se explica el almacenamiento de energía térmica en hormigón para aplicaciones térmicas industriales, manteniendo una visión global, por este motivo este se sitúa en la introducción dentro de los sistemas de almacenamiento existentes, se explican estos de manera breve clasificándose según su naturaleza. Posteriormente se desarrolla de manera más detallada los sistemas de almacenamiento de energía térmica según el medio de almacenamiento que utilicen, el sistema de contención del mismo, o el mecanismo de transferencia, además se explica la importancia de realizar un diseño a nivel de planta, de componente y de sistema y se explican los sistemas de almacenamiento utilizados plantas termosolares (sistema de almacenamiento en termoclina, acumulador de vapor, sistemas de almacenamiento en dos tanques, entre otros), la integración de un sistema de almacenamiento en una planta termosolar es fundamental para llegar a generar electricidad, vapor, calor de proceso, frío (a través de una máquina de absorción) sin necesidad de recurrir a los combustibles fósiles. La cantidad de energía que una planta termosolar puede transformar en electricidad, en vapor, o en cualquier proceso que requiera energía térmica, depende de la radiación solar que hay cada día, por lo tanto, al incorporar un sistema de almacenamiento podemos cubrir los picos de demanda independientemente de las condiciones climatológicas. En el Anexo 1, se explica la energía termosolar de concentración y las principales tecnologías que lo componen.

A pesar de la diversidad de sistemas de almacenamiento existentes, a principio de los años 2000, se empezó a investigar y ensayar un nuevo sistema de almacenamiento de energía térmica pasivo en medio sólido. Este tipo de TES consiste en un bloque de hormigón que contiene un sistema de transferencia de calor instalado en su interior. El hormigón es un material que posee excelentes propiedades térmicas y mecánicas, pero al trabajar a altas temperaturas este sufre ciertas transformaciones que afectan a sus propiedades, por este motivo se han llevado a cabo numerosas investigaciones sobre las posibles combinaciones de materiales y de agregados que permiten mejorar las propiedades del hormigón a altas temperaturas, se han analizado diferentes mezclas de hormigón entre las que destacan el hormigón reforzado con fibras de polipropileno, hormigón con agregados de bauxita y basalto, el hormigón desarrollado por la empresa EnergyNest llamado Heatcrete, que posee excelentes propiedades a altas temperaturas.

En cuanto al intercambiador de calor instalado en el bloque de hormigón, este debe ser de un material adecuado que permita favorecer la transferencia de calor entre el fluido térmico y el hormigón, como, por ejemplo, el acero o el acero al carbono. Los tubos del intercambiador de calor pueden ser de distinta geometría, entre la que destaca la geometría en espiral, (5 aletas – permite almacenar un 9.13% de energía extra), pero debido a su excesivo coste (coste extra de 382.80%) comercialmente se suelen usar tubos lisos o tubos en U (doble tubo).

En el tercer apartado se recogen diferentes aplicaciones encontradas en la literatura, que utilizan un sistema de almacenamiento de energía en hormigón, se explica el proyecto llevado a cabo, y el resultado de las pruebas realizadas en los mismos. Además, se dan datos sobre la geometría del sistema y la disposición de los tubos. Entre las aplicaciones destacan distintos proyectos llevados a cabo por la empresa EnergyNest y el proyecto EDITOR, cuyo sistema de almacenamiento está diseñado por la empresa CADE soluciones de ingeniería.

Para realizar un prediseño de este sistema de almacenamiento térmico se utilizan programas como Modelica, que siguiendo modelos de elementos finitos permiten obtener un prediseño que se aproxima a la realidad de manera óptima, sin embargo estas simulaciones son complejas y requieren de mucho tiempo, es por esto, que en este trabajo final de máster se ha utilizado un modelo matemático simplificado que permite realizar un prediseño de una manera sencilla, mediante el uso de expresiones sencillas, en el apartado 4, se demuestra que para las temperaturas medias con el modelo matemático simplificado se obtienen resultados muy próximos a aquellos obtenidos por un modelo de elementos finitos mucho más complicado.

En el quinto apartado se ha realizado un análisis de sensibilidad que permite establecer ciertas conclusiones de diseño; en primer lugar, se parte desde un caso base, se trata de un sistema de almacenamiento formado por cuatro submódulos de hormigón de  $0,44 \times 0,44 \times 5 \text{ m}^3$ , colocados de dos en dos en serie y estos a su vez en paralelo, formando un sistema equivalente de 40 tubos y 10 metros de longitud, este sistema se carga en cuatro horas (si se considera el tiempo de carga como el tiempo en el que se almacena el 95 % de la energía que se podría almacenar), y la capacidad total de almacenamiento es de 122 kWh. En segundo lugar, se lleva a cabo un

análisis paramétrico en el cual se analiza que ocurre al variar la velocidad a la que el fluido térmico circula por cada uno de los tubos, la velocidad de entrada del fluido térmico suele ser del orden de 0,2 m/s o 0,3 m/s; al aumentar en un 50 % el valor de esta aumenta el caudal másico que circula por los tubos un 50 %, y el tiempo de carga disminuye un 18 %.

También se analiza que ocurre al variar la distancia entre los tubos, esta suele ser del orden de varios centímetros, en el caso base se ha supuesto de 11 cm, al aumentar este valor un 9,1 % si mantenemos el número de tubos constante, va a aumentar el volumen de hormigón que rodea a un solo tubo, y en consecuencia el volumen total aumenta también un 9,1 %, esto influye en la capacidad de almacenamiento del sistema que aumenta un 20 % y al ser mayor el volumen, el tiempo de carga aumenta un 15 %.

Al analizar que ocurre al aumentar la distancia entre los tubos, si el volumen total se mantiene invariable, el número de tubos va a disminuir un 15 %, la capacidad de almacenamiento total se mantiene invariable, y el tiempo de carga aumenta un 15 % ya que el volumen del prisma hexagonal que rodea a un solo tubo es mayor.

Se ha realizado otro análisis eligiendo un tubo de 0,0213 m de diámetro interior, aumentamos el diámetro del tubo elegido a otro de 0,025 m de diámetro interior, (es decir aumenta el diámetro interior de los tubos en un 17,37%) y los resultados no varían de forma relevante, ya que el tiempo de carga disminuye un 2 % y la capacidad de almacenamiento lo hace un 3 %. Además, se ha probado con otros tubos que no se han incluido en el análisis ya que elegir un tubo u otro no influye de forma relevante en el comportamiento del sistema.

Al aumentar la longitud del bloque de hormigón, aumenta el volumen de hormigón que rodea a un solo tubo, y en consecuencia el volumen total del sistema; por lo tanto, aumenta la energía almacenada por un solo tubo y la capacidad de almacenamiento total. Cabe destacar que, al aumentar la longitud del bloque de hormigón de 5 m a 10 m, se duplica la capacidad de almacenamiento, sin embargo, el tiempo de carga aumenta ligeramente siendo este de 3,6 horas si la longitud es de 5 m y de 4 horas si la longitud es de 10 m, teniendo en cuenta que se considera como tiempo de carga el tiempo que tarda en almacenarse el 95 % de la energía que se podría almacenar, es decir el tiempo de carga aumenta sólo un 10 % al duplicar la longitud del bloque de hormigón.

Si aumenta la diferencia de temperaturas entre el fluido térmico a la entrada y el hormigón, es decir, si se supone que el fluido térmico proviene del campo solar a una temperatura mayor (un 3,1 % mayor), la energía almacenada por el hormigón aumenta un 18%, y el tiempo de carga disminuye un 2,5 %.

Por otra parte, al utilizar un tipo de hormigón con un calor específico mayor aumenta el tiempo de carga, pero también lo hace la capacidad de almacenamiento.

Otro dato interesante que se obtiene del análisis paramétrico es que al aumentar la resistencia de contacto entre el tubo y el hormigón un 60 % aumenta el tiempo de carga del sistema un 17 %.

Al probar con distintos fluidos térmicos se observa que al utilizar aquellos que posean un alto calor específico, alta conductividad térmica, y baja viscosidad el tiempo de carga será menor.

Finalmente para cerrar el quinto apartado, se lleva a cabo un caso práctico en el cual dadas ciertas especificaciones de diseño se diseña un sistema de almacenamiento térmico en hormigón que las cumple, el sistema equivalente que cumple los requisitos de diseño es un sistema de 10 metros de longitud, y 90 tubos, separados a una distancia de 0,125 m; para poder enviarlo en camiones se divide este sistema en 6 submódulos de 5 metros de longitud y 30 tubos, colocados de dos en dos en serie y estos tres a su vez en paralelo, tal y como se puede observar en la figura 88.

# Anexo 1. Energía termosolar de concentración.

A diferencia de otras fuentes de energía renovable, la combinación de la energía solar por concentración (CSP) con el sistema de almacenamiento de energía térmica (TES) posee la característica de que la energía que se genera puede ser recogida y utilizarse posteriormente, resolviendo la intermitencia del recurso de la energía solar.

El almacenamiento de energía térmica es clave para las centrales termosolares, en los proyectos actuales de centrales termosolares de colectores cilindro-parabólicos, la tecnología de almacenamiento térmico más utilizada es el almacenamiento térmico en sistemas de dos tanques con sales fundidas, sin embargo esta tecnología presenta ciertas desventajas como son los altos costes de inversión y el punto de congelación alto de las sales fundidas, por este motivo es una opción atractiva utilizar hormigón como material de almacenamiento de energía térmica. La Energía Solar por Concentración (CSP) consiste en concentrar calor (procedente del sol) en un punto. De esta manera, se genera vapor para impulsar la turbina. Además, este tipo de plantas pueden funcionar constantemente, ya que parte del calor es almacenado, lo que permite seguir produciendo vapor y suministrar energía en ausencia de irradiación solar.

Los sistemas de energía solar térmica de concentración producen calor o electricidad mediante el uso de cientos de espejos o lentes que concentran los rayos del sol a unas temperaturas que oscilan entre 300 y 1.000° C. La energía eléctrica se produce cuando la luz concentrada se convierte en calor, que impulsa un motor térmico conectado a un generador de electricidad.

Existen distintos tipos de tecnologías (gran variedad de formas de espejos, métodos de seguimiento solar y de generación de energía útil pero todos ellos funcionan bajo el mismo principio) estas producen diferentes temperaturas máximas con sus correspondientes eficiencias termodinámicas, debido a las diversas formas debido a las diversas formas en que ellos siguen al sol y enfocan la luz.

Existen cuatro tipos principales de tecnologías de concentración: los canales cilindro-parabólicos, los reflectores de Fresnel, los sistemas de motores Stirling de disco parabólico y las torres de receptores centrales, todos estos se pueden integrar con un sistema de almacenamiento. Un sistema de almacenamiento de energía debe trabajar en conjunto con el campo solar y el bloque de energía. En una simulación se deben integrar estos tres subsistemas para predecir y mejorar la estrategia de operación y el rendimiento de las plantas de concentración solar.

Para tomar ciertas decisiones respecto a las plantas de concentración solar y si se debe integrar el almacenamiento térmico es necesario evaluar las compensaciones entre la producción, los costos de capital adicionales, entre otros. Es decir, es imprescindible estudiar los aspectos técnicos y económicos.

En la figura 93 se muestra un esquema que engloba las diferentes tecnologías de concentración existentes, estas producen diferentes temperaturas máximas con sus correspondientes eficiencias termodinámicas, debido a las diferentes formas en las que estas siguen el sol y enfocan la luz.

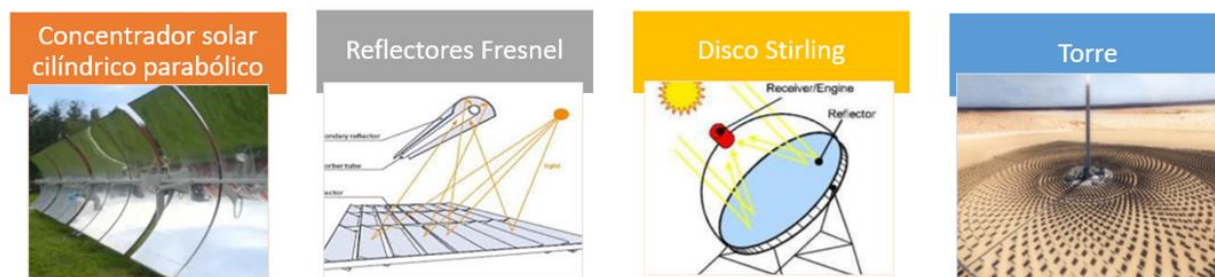


Figura 93. Tecnologías utilizadas en plantas termosolares de concentración.

## Concentrador solar cilíndrico parabólico.

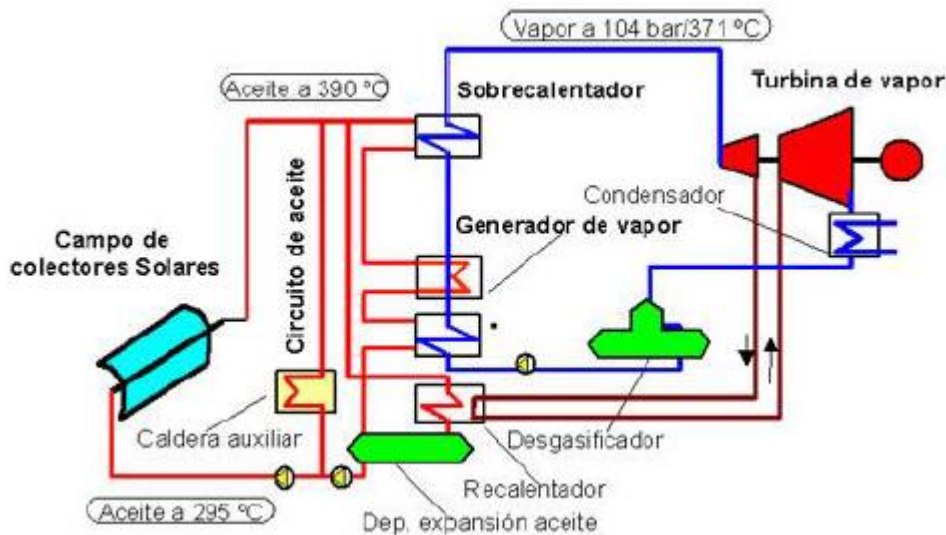
En una planta termosolar de concentradores solares cilíndricos parabólicos, el campo solar es modular y está compuesto por muchas filas paralelas de colectores solares alineados en un eje horizontal norte-sur.

La central termosolar de canales parabólicos usa espejos cóncavos montados en forma de canal para dirigir los rayos del sol hacia el fluido, los espejos concentran los rayos de sol, estos son recibidos sobre una tubería de vidrio que contiene el fluido a calentar, este fluido adquiere la energía solar, y una vez que ha alcanzado temperaturas entre 150° y 350° se transporta hacia un motor térmico, donde cede energía térmica para su transformación. Este proceso permite obtener energía eléctrica o almacenarla para su uso posterior.

El sistema de espejos cóncavos se denominan colectores cilíndrico-parabólicos, estos se montan sobre una estructura que permite girarlos, de tal forma que la radiación directa permanece enfocada en el receptor, es decir el diseño no necesita hacer seguimiento en un segundo eje, ya que no se necesita ajustar los espejos.

La mayor parte de las plantas de energía solar (70%) que existen utilizan esta tecnología, ya que su desarrollo es mayor, frente al resto de tecnologías existentes.

En la figura 94 se muestra un esquema de una central termosolar con colectores cilindro parabólica sin almacenamiento térmico.



**Figura 94.** Esquema de una central termosolar cilindro parabólica sin almacenamiento térmico. [16]

Como ya se ha explicado, el almacenamiento térmico permite almacenar energía en exceso en forma de energía térmica para luego utilizarla para generar energía eléctrica cuando no se disponga de radiación solar. Se tiene energía solar en exceso cuando solo se aprovecha una fracción de la radiación directa incidente sobre el campo solar para la generación de energía eléctrica. Por otra parte, el almacenamiento térmico permite a las plantas termosolares generar mayor energía eléctrica que una planta termosolar que no posea sistema de almacenamiento, a misma potencia instalada.

España posee la mayor cantidad de instalaciones de energía solar térmica en el mundo, junto con EE. UU. en segundo lugar. Como ejemplo de ello, se encuentra Andasol, localizada en Aldeire, Granada, esta planta de canales parabólicos utiliza un sistema de almacenamiento de dos tanques indirectos, con una capacidad 49,9 MWe y 7,7 h de almacenamiento térmico.

## Reflectores Fresnel

Este tipo de central termosolar que se encuentra en vías de desarrollo está compuesta por hileras de espejos planos sobre una estructura. Esta tecnología sustituye el espejo cóncavo por espejos planos con inclinaciones adecuadas que concentran la luz solar sobre los tubos que conducen el fluido a calentar.

El objetivo de los reflectores lineales Fresnel es conseguir un aprovechamiento similar a las centrales termosolares de canales parabólicos, el hecho de usar espejos planos disminuye el coste de la instalación, ya que

es más sencillo fabricar espejos planos que fabricarlos cóncavos, y estos espejos comparten receptores, y al no necesitar sostener los receptores sus estructuras son más simples.

Las principales centrales españolas que utilizan esta tecnología son: El Centro Nacional de Energías Renovables (CENER), o la Plataforma Solar de Almería de CIEMAT.

### **Disco Stirling**

Una central termosolar con discos parabólicos de Stirling cuenta con concentradores parabólicos independientes. Un disco Stirling consiste en un reflector parabólico único que concentra la luz en un receptor posicionado en el punto focal del reflector. El reflector sigue la posición del sol en dos ejes para mantenerse perpendicular a la radiación incidente en él. El fluido de trabajo es calentado entre 250°C y 700°C y, posteriormente, el motor Stirling transforma esta energía térmica en electricidad.

### **Torre**

La central termosolar de helióstatos con receptor central en torre requiere de una gran superficie, y en la superficie de la central se colocan distribuidos los heliostatos (conjunto de reflectores), estos tienen capacidad de seguimiento en dos ejes, el objetivo es captar los rayos solares siguiendo la trayectoria del sol y reflejando los mismos en un punto concreto, el objetivo es concentrar la radiación solar sobre un receptor central instalado en una torre. El receptor contiene el fluido de trabajo, el cual puede llegar a alcanzar temperaturas entre 500°C y 1000°C.

El movimiento de las bases de los heliostatos se realiza gracias a ciertos sistemas de automatización, cada heliostato requiere un posicionamiento y regulación de sus ejes distintos, ya que cada uno posee una ubicación distinta respecto al foco de la torre, es por esto por lo que estos sistemas se encuentran en desarrollo y están menos avanzados que los sistemas cilíndricos parabólicos.

## Anexo 2. Modelo EES.

```
"Datos de entrada, experimento indicado en el artículo"
di=0,015
do-o=0,018 "diámetro exterior del tubo"
do=0,134 "distancia entre tubos"
qv_total= 20 "m3/h"
Ntubos=132
A_tubo=(PI*(di^2))/4
Vhtf=(qv_total/Ntubos)*(1/3600)*(1/A_tubo)
T_inf=364 "°C"
T_ini=337
whL=(3*(do^2)*L)/(2*SQRT(3))-((PI*((do-o)^2)*L)/4) "volumen de hormigón que
rodea a un único tubo"
L=8,37 "longitud del bloque de hormigón en m"
A=PI*(do-o)* "Área interfaz tubo-hormigón*, área lateral de un cilindro"
Rtub_h=0,0025 "se indica en el artículo"
Dif_Temp=(T_inf-T_ini)
tiempo=3600
"Propiedades del fluido térmico"
"Sylherm 800, empleando las correlaciones del artículo"
rho_1= -0,00060227*T_inf^2 - 0,79453*T_inf + 958,65 "(kg/m^3)"
mu_1= 0,0000000000014155*(T_inf)^4 - 0,0000000016588*(T_inf)^3+
0,00000071777*(T_inf)^2 - 0,00014047*(T_inf) + 0,011417
Cp_1=(1,700*T_inf)+1,575*10^3
c_2=1,700
c_1=1,575*10^3
k_1=(-1,905*10^(-4))*T_inf+(1,400*10^(-1))
"qv_htf=qv_total/Ntubos" "m3/kg de un solo tubo"
"qm_htf=(qv_htf/3600)*rho_1" "kg/s"
qm_htf=A_tubo*Vhtf*rho_1
"Propiedades del hormigón" "Hight-T concrete"
rho_c=2,25*10^3
cp_c=(8,75*10^(-1)*T_inf)+(7*10^2)
"k_c=(-6,667*10^(-4)*T_ini)+(1,467*10^0)"
"Ecuaciones a resolver"
"Paso 1"
Re=(rho_1*Vhtf*di)/mu_1
Pr=(mu_1*Cp_1)/k_1
F=(0,79*LN(Re)-1,64)^(-2)
"Paso 2"
Nusselt=(F/8*(Re-1000)*Pr)/(1+12,7*((F/8)^(1/2))*((Pr^(2/3))-1))
"Paso 3" "Se obtiene el coeficiente convectivo h"
Nusselt=(h*di)/k_1
"Paso 4" "Longitud característica (del bloque de hormigón)"
L_c=whL/A "es Volumen_horm/A_interfaz, ver ec 13 articulo"
fi=do/di
```



$$A_r=L/L_c$$

"Paso 5" " Factor corrector"

$$f_{corr}=1/((((3,308*10^{(-5)})*fi)-(3,511*10^{(-5)})*((100*L/L_c)+Re))+2)$$

$$f_{corr2}=1/((((3,308*10^{(-5)})*fi)-(3,511*10^{(-5)})*((100*L/L_c)+Re))+2+(Rtub_h*h))$$

"Paso 6"

$$T_{media_c}=T_{inf}-(Dif\_Temp*EXP((-h)*f_{corr2}*tiempo)/(rho_c*cp_c*L_c))$$

"Paso 7"

$$Q=PI*di*L*h*f_{corr2}*Dif\_Temp*EXP((-h)*f_{corr2}*tiempo)/(rho_c*cp_c*L_c)$$

"Paso 8"

$$E=rho_c*whL*cp_c*Dif\_Temp*(1-EXP((-h)*f_{corr2}*tiempo)/(rho_c*cp_c*L_c))$$

"Paso 9" "Tiempo de carga y descarga"

Etstg=10000 "Tengo que dar un valor para la energía que quiero liberar, de esta manera se obtiene el tiempo de carga o descarga"

$$tstg=(-(rho_c*cp_c*L_c)/(h*f_{corr2}))*LN(1-(Etstg/(rho_c*whL*cp_c*Dif\_Temp)))$$

"Paso 10"

$$Th_{tf\_out1}=(-c_1+SQRT((c_1^2)-4*c_2*((Q/qm_{htf})-Cp_1*T_{inf})))/(2*c_2)$$

$$Th_{tf\_out2}=(-c_1-SQRT((c_1^2)-4*c_2*((Q/qm_{htf})-Cp_1*T_{inf})))/(2*c_2)$$

Run	tiempo	T <sub>media;c</sub>
Run 1	0	337
Run 2	5143	347,2
Run 3	10286	353,6
Run 4	15429	357,5
Run 5	20571	360
Run 6	25714	361,5
Run 7	30857	362,4
Run 8	36000	363
Run 9	41143	363,4
Run 10	46286	363,6
Run 11	51429	363,8
Run 12	56571	363,9
Run 13	61714	363,9
Run 14	66857	363,9
Run 15	72000	364

Figura 95. Ejemplo de tablas paramétricas.

1..17	tiempo	$T_{media;c}$	$T_{media;cdlr}$	$T_{media;cf}$	$T_{media;hc}$
Run 1	0	264	264	264	264
Run 2	3600	279,3	278,3	278,4	276,8
Run 3	7200	289,9	288,5	288,6	286,3
Run 4	10800	297,3	295,8	295,9	293,4
Run 5	14400	302,4	301	301,1	298,7
Run 6	18000	305,9	304,7	304,8	302,6
<b>Run 7</b>	21600	308,4	307,4	307,4	305,5
Run 8	25200	310,1	309,3	309,3	307,7
Run 9	28800	311,3	310,6	310,7	309,3
Run 10	32400	312,1	311,6	311,6	310,5
Run 11	36000	312,7	312,3	312,3	311,4
Run 12	39600	313,1	312,8	312,8	312,1
Run 13	42300	313,3	313	313,1	312,5
Run 14	46800	313,6	313,4	313,4	312,9
Run 15	50400	313,7	313,6	313,6	313,2
Run 16	54000	313,8	313,7	313,7	313,4

Figura 96. Ejemplo de las tablas paramétricas en las comparaciones.

# REFERENCIAS

- [1] Alva, G., Lin, Y., & Fang, G. (2017). An overview of thermal energy storage systems . *Energy 144*, 341-378.
- [2] Bergan, P., & Greiner, C. (2014). A new type of large scale thermal energy storage. *Energy Procedia 58*, 152-159.
- [3] Brazo Reina, M. (2016). *Sistema pasivo de almacenamiento de energía térmica en centrales termosolares*. Universidad de Sevilla: Trabajo fin de grado.
- [4] Calvo Antón, I. (2018). *Diseño y análisis de capacitores superdieléctricos NaCl para el almacenamiento de energía eléctrica*. Universidad de Vigo: Trabajo fin de grado.
- [5] Company, E. C. (s.f.). *Cspfocus. Therminol Heat Transfer Fluids*. Obtenido de <http://www.cspfocus.cn/ueditor/net/upload/2019-08-16/148c7ad8-4be7-462a-868e-339dea39f1dd.pdf>
- [6] Doretto, L., Martelletto, F., & Mancín, S. (2019). A simplified analytical approach for concrete sensible thermal energy storages simulation . *Journal of Energy Storage 22*, 68-79.
- [7] DOW. (s.f.). Obtenido de DOWTHERM™ Q Technical Data Sheet: <https://www.dow.com/content/dam/dcc/documents/en-us/productdatasheet/176/176-01467-01-dowtherm-q-tds.pdf?iframe=true>
- [8] Dr. Selvan, R., Dr. Hale, M., Strass, M., & Dr. R. Panneer Selvan, Dr. Micah Hale, Matt Strass. (s.f.). Obtenido de Development and Performance Evaluation of High Temperature Concrete for Thermal Energy Storage for Solar Power Generation: <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/1072014>
- [9] Ferone, C., Colangelo, F., Frattini, D., Roviello, G., Cioffi, R., & di Maggio, R. (2014). Finite Element Method Modeling of Sensible Heat Thermal Energy Storage with Innovative Concretes and Comparative Analysis with Literature Benchmarks. *Energies 7* , 5291-5316.
- [10] Girardi, F., Giannuzzi, G., Mazzei, D., Salomoni, V., Majorana, C., & Di Maggio, R. (2017). Recycled additions for improving the thermal conductivity of concrete in preparing energy storage systems. *Construction and Building Materials 135*, 565-579.
- [11] Hermosin Aumente, A. (2016). *Diseño y estudio de viabilidad de una central hidroeléctrica reversible en la isla de la Gomera*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI): Trabajo fin de grado, 2016.
- [12] Hoivik, N., Greiner, C., Barragan, J., Crespo Iniesta, A., Skele, G., Bergan, P., . . . Calvet, N. (2019). Long-term performance results of concrete-based modular thermal energy storage system. *Journal of Energy Storage 24*.
- [13] Iberdrola. (s.f.). Obtenido de <https://www.iberdrola.com/medio-ambiente/almacenamiento-de-energia-eficiente>
- [14] Jian, Y., Bai, F., Falcoz, Q., & Wang, Z. (2015). Control strategy of the module concrete thermal energy storage for parabolic trough power plants. *Energy Procedia 69*, 891-899.
- [15] Kuravi, S., Trahan, J., Goswami, D., Rahman, M., & Stefanakos, E. (2013). Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants. *Progress in Energy and Combustion Science*.
- [16] Larrain, D. (2015). *Desarrollo de un sistema de almacenamiento térmico para la central termosolar Astexol 2*. Universidad Politécnica de Madrid: Trabajo fin de grado.
- [17] Liang, D., Bahl, C., Bauer, T., Fiss, M., & Breidenbach, N. (2012). High-Temperature solid-media thermal energy storage for solar thermal power plants. *Proceedings of the IEE. Vol 100 No. 2*, 516.
- [18] LLadó Sánchez, A. (2015). *Estudio del almacenamiento de energía mediante aire comprimido*. Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Manresa: Trabajo fin de grado.
- [19] López Redondo, N. (16 de 09 de 2019). *Energynews*. Obtenido de Así funcionan la baterías térmicas como

impulso a la descarbonización: <https://www.energynews.es/asi-funcionan-la-baterias-termicas-como-impulso-a-la-descarbonizacion/>

- [20] Martins, M., Villalobos, U., Delclos, T., Armstrong, P., Berga, P., & Calvet, N. (2015). New concentrating solar power facility for testing high temperature concrete thermal energy storage. *Energy Procedia* 75, 2144 – 2149.
- [21] Monar González, M. (2017). *Sistema de almacenamiento de energía térmica basado en vapor en centrales termosolares. Análisis y modelado*. Universidad de Sevilla : Trabajo fin de grado.
- [22] Planas, O. (30 de mayo de 2018). *Energía Solar*. Obtenido de <https://solar-energia.net/energia-solar-termica/colector-solar-termico/colector-solar-concentracion>
- [23] Salomoni, V., Majorana, C., Giannuzzi, G., Miliozzi, A., Di Maggio, R., Girardi, F., & Mele, D. (2014). Thermal storage of sensible heat using concrete modules in solar power plants. *Solar Energy* 103, 303–315.
- [24] Sattler, J., Alexopoulos, S., Chico Caminos, R., Mitchell, J., Ruiz, V., Kalogirou, S., . . . Herrmann, U. (2019). Dynamic Simulation Model of a Parabolic Trough Collector System with Concrete Thermal Energy Storage for Process Steam Generation. *AIP Conference Proceedings* 2126.
- [25] Sattler, J., Chico Caminos, R., Ürlings, N., Dutta, S., Ruiz, V., Kalogirou, S., . . . Herrmann, U. (2020). Operational Experience and Behaviour of a Parabolic Trough Collector System with Concrete Thermal Energy Storage for Process Steam Generation in Cyprus. *AIP Conference Proceedings* 2303, 140004.
- [26] SolarPaces, G. (2009). *Solarpaces.org*. Obtenido de Energía solar térmica de concentración. Perspectiva mundial 2009: [http://www.solarpaces.org/wp-content/uploads/csp\\_2009\\_spanish.pdf](http://www.solarpaces.org/wp-content/uploads/csp_2009_spanish.pdf)
- [27] Suárez, C., Iranzo, A., Pino, F., & Guerra, J. (2015). Transient analysis of the cooling process of molten salt thermal storagetanks due to standby heat loss. *Applied Energy* 142, 56.65.
- [28] Suárez, C., Pino, F., & Guerra, J. (2020). A new simplified model for the unsteady response of concrete passive sensible TES systems. *Journal of Energy Storage* 27.
- [29] Utkucan, S. (2018). A new non-iterative friction factor correlation for heat transfer fluids in absorber tube of parabolic trough collector. *Engineering Science and Technology, an International Journal* 21, 89-98.
- [30] Zaversky, F., Pérez de Zabalza Asian, 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.