



Universitat de Lleida

Emmagatzematge d'energia tèrmica d'alta temperatura per aplicacions de fred solar i centrals termosolars

Gerard Peiró Bell-Iloch

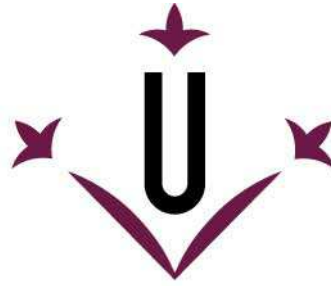
<http://hdl.handle.net/10803/462071>



Emmagatzematge d'energia tèrmica d'alta temperatura per aplicacions de fred solar i centrals termosolars està subjecte a una llicència de [Reconeixement-NoComercial-SenseObraDerivada 4.0 No adaptada de Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Les publicacions incloses en la tesi no estan subjectes a aquesta llicència i es mantenen sota les condicions originals.

(c) 2017, Gerard Peiró Bell-Iloch



Universitat de Lleida

TESI DOCTORAL

Emmagatzematge d'energia tèrmica d'alta temperatura per aplicacions de fred solar i centrals termosolars

Gerard Peiró Bell-lloch

Memòria presentada per optar al grau de Doctor per la Universitat de Lleida
Programa de Doctorat en Informàtica i Enginyeria Industrial

Director/a
Dra. Luisa F. Cabeza

Tutor/a
Dra. Luisa F. Cabeza

2017

Agraïments

Voldria expressar el meu agraïment a la meva directora de tesi, la Dra. Luisa F. Cabeza, per la seva dedicació, direcció i suport durant els anys que estat realitzant la present tesi doctoral. També voldria agrair-li el haver-me concedit l'oportunitat d'aprendre i formar-me com a persona i professional durant els 8 anys que he treballat al grup de recerca GREA de la Universitat de Lleida.

M'agradaria agrair al govern d'Espanya (Fondo tecnológico IDI-20090393, ConSOLida CENIT 2008-1005, ENE2008-06687-C02-01/CON, ENE2011-22722, ULLE10-4E-1305 i ENE2015-64117-C5-1-R (MINECO/FEDER)) a l'empresa Abengoa Solar NT, a l'European Commission Seventh Framework Programme (FP/2007-2013) under Grant agreement N° PIRSES-GA-2013-610692 (INNOSTORAGE), a l'European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 657466 (INPATH-TES) el finançament i suport rebuts. També agrair al govern de la Generalitat de Catalunya per la certificació com agent TECNIO en la categoria de desenvolupador de tecnologia proporcionada al grup de recerca GREA i també per l'acreditació del segell de qualitat (2014 SGR 123).

Vull donar les gràcies als companys/es del grup GREA, per la seva ajuda i per haver après molt treballant al seu costat. En especial, al company de la línia de recerca d'alta temperatura Jaume Gasia. També voldria agrair l'ajuda i suport rebuts dels excompanys/es del GREA amb qui vaig tenir el plaer de treballar, el Dr. Antoni Gil, el Dr. Eduard Oró, la Dra. Ingrid Martorell i la Dra. Laia Miró.

Agrair també, als meus amics i amigues de Puigverd de Lleida el suport rebut i alhora per gaudir, compartir, aprendre d'ells i elles i en definitiva créixer junts.

Finalment, voldria dedicar la meva més sincera gratitud a la meva família, el meu pare, mare, germana, i germà i avis allà on siguin, per l'educació i valors rebuts, pel seu esforç diari perquè jo arribés aquí. Així com per insistir, confiar en mi i sobretot pel seu suport incondicional. Sense ells i elles, aquesta tesi doctoral no hauria estat possible.



Resum

Durant els últims anys les energies renovables s'han convertit en un factor clau en la lluita contra el canvi climàtic. Avui en dia la tecnologia més prometedora es basa en l'energia solar. Però la disponibilitat d'aquesta es presenta com el principal problema causant diferències entre l'energia generada i la demandada. Aquest fet suposa un desavantatge competitiu enfront les tecnologies convencionals basades en els combustibles fòssils. Una de les possibles solucions és l'emmagatzematge d'energia tèrmica, el qual permet corregir el desajust entre l'energia generada i la demandada així com incrementar l'eficiència, capacitat i flexibilitat del camp solar.

Donada la importància dels sistemes d'emmagatzematge per la viabilitat tècnica i econòmica de la tecnologia solar, es fa necessària la recerca centrada en el desenvolupament de sistemes d'emmagatzematge per tal d'obtenir informació extrapolable a dissenys comercials. Per aquesta raó, la present tesi doctoral es centra en la validació i caracterització experimental, a escala de planta pilot, de diferents sistemes d'emmagatzematge per aplicacions de fred solar i centrals termosolars.

Per una banda, s'han estudiat dues tècniques de millora de la transferència de calor entre el fluid calor portador i el material d'emmagatzematge (materials de canvi de fase) en sistemes d'emmagatzematge per calor latent per aplicacions de fred solar. La tècnica multi-fase i l'addició de superfícies esteses. Per altra banda, s'ha estudiat la viabilitat d'un intercanviador de plaques de fluid caloportador-sals per operar en un sistema d'emmagatzematge de doble tanc per plantes termosolars de cilindre parabòlic. A més a més, s'ha estudiat la influència del fluid caloportador en el procés de transferència de calor en el mateix intercanviador de plaques.

Per tal de realitzar l'experimentació que es mostra en la present tesi s'ha utilitzat la planta pilot que es disposa a la Universitat de Lleida construïda l'any 2008 amb la col·laboració industrial de l'empresa Abengoa.



Resumen

Durante los últimos años las energías renovables se han convertido en un aspecto clave en la lucha contra el cambio climático. Actualmente la tecnología más prometedora se basa en la energía solar. Pero la disponibilidad de esta se presenta como el principal problema causando diferencias entre la energía generada y la demandada. Esto supone una desventaja competitiva respecto a las tecnologías que se basan en los combustibles fósiles. Una de las posibles soluciones es el almacenamiento de energía térmica, el cual permite corregir el desajuste entre la energía generada i la demandada, así como incrementar la eficiencia, capacidad i flexibilidad del campo solar.

Dada la importancia de los sistemas de almacenamiento de energía para la viabilidad técnica y económica de la tecnología solar, se hace necesaria la investigación centrada en el desarrollo de sistemas de almacenamiento para obtener información extrapolable a diseños comerciales. Por esta razón, la presente tesis doctoral se centra en la validación i caracterización experimental, a escala de planta piloto, de sistemas de almacenamiento de energía térmica para aplicaciones de frío solar y para plantas termosolares.

Por un lado, se han estudiado dos técnicas de mejora de la transferencia de calor entre el fluido caloportador i el material de almacenamiento (materiales de cambio de fase) en sistemas de almacenamiento de energía por calor latente para aplicaciones de frío solar. La técnica multi-fase y la adición de superficies extendidas. Por otro lado, se ha estudiado la viabilidad de un intercambiador de placas de fluido caloportador-sales para operar en un sistema de almacenamiento térmico de doble taque para plantas termosolares de cilindro parabólico. Además, se ha estudiado la influencia del fluido caloportador en el proceso de transferencia de calor en el mismo intercambiador.

Para realizar la experimentación mostrada en esta tesis se ha utilizado la planta piloto que se dispone en la Universidad de Lleida, construida el año 2008 con la colaboración industrial de la empresa Abengoa.



Summary

In recent years, renewable energies have become a key factor to fight against global climate change. Nowadays, the most promising renewable technology is based on solar energy. However, solar technologies are dependent on the climate, causing differences in the energy generated and demanded. In consequence, the solar technologies have a disadvantage against conventional technologies based on fossil fuels. One of the possible solutions to overcome this problem is thermal energy storage (TES). TES systems allow correcting the mismatch between the energy supply and demand, as well as increasing the efficiency, capacity and flexibility of the solar field.

Due to the importance of TES in solar technology for its technic and economic feasibility, it is necessary the research on developing TES systems in order to collect information to be able to extrapolate to commercial designs. For this reason, this PhD thesis is focused on experimental validation and characterization at pilot plant scale of the different TES systems for solar cooling and concentrated solar power plants (CSP) applications.

On the one hand, different latent heat storage systems (LTES) using phase change materials (PCM) for solar cooling applications was tested to quantify two different heat transfer enhancement techniques between heat transfer fluid (HTF) and PCM. The multiple PCM concept and the addition of extended surfaces. On the other hand, a pilot plant based on the design of Two-tank molten salts sensible TES system used in commercial parabolic through CSP plants was used to test the feasibility of HTF-salt plate heat exchanger and to characterise the influence of HTF on heat transfer process in the same plate heat exchanger.

For all experimentation showed in this PhD thesis, a pilot plant designed and built at University of Lleida in 2008 in collaboration with Abengoa Company was used.



Universitat de Lleida



ÍNDEX

1	Introducció	1
1.1	Context energètic i mediambiental actual	1
1.2	Estat actual de la tecnologia solar	4
1.3	L'emmagatzematge d'energia tèrmica per aplicacions de fred solar i per centrals termosolars.....	11
1.4	Avantatges e inconvenients de l'emmagatzematge d'energia tèrmica.....	13
1.5	Referències.....	16
2	Objectius	19
3	Metodologia i estructura de la tesi doctoral	20
3.1	Descripció de la planta pilot experimental.....	20
3.2	Estructura de tesi	29
3.3	Referències.....	30
4	Avaluació experimental a escala de planta pilot de la configuració de múltiples PCMs en cascada respecte la configuració amb un únic PCM per a l'emmagatzematge d'energia tèrmica	32
4.1	Introducció	32
4.2	Contribució a l'estat de l'art.....	33
4.3	Contribució del candidat.....	35
4.4	Article	36
4.5	Referències.....	36
5	Anàlisi experimental de la millora de la conductivitat tèrmica efectiva de PCM mitjançant tubs aletejats en tancs per aplicacions d'alta temperatura	38
5.1	Introducció	38
5.2	Contribució a l'estat de l'art.....	39
5.3	Contribució del candidat.....	42
5.4	Article	43
5.5	Referències.....	43



6 Anàlisi experimental dels processos de càrrega i descàrrega amb configuració equicorrent i a contracorrent d'un sistema d'emmagatzematge de sals foses per aplicacions d'alta temperatura ...	45
6.1 Introducció	45
6.2 Contribució a l'estat de l'art.....	46
6.3 Contribució del candidat.....	48
6.4 Article	49
6.5 Referències.....	50
7 Influència del fluid de transferència de calor en el procés de càrrega d'un sistema d'emmagatzematge de doble tanc amb sals foses per aplicacions termosolars	51
7.1 Introducció	51
7.2 Contribució a l'estat de l'art.....	53
7.3 Contribució del candidat.....	55
7.4 Article	56
7.5 Referències.....	56
8 Conclusions i treball futur.....	58
8.1 Conclusions de la tesi	58
8.2 Recomanacions i treball futur.....	61
9 Altres activitats de recerca.....	64
9.1 Participació en altres articles publicats en revistes SCI	64
9.2 Participació en congressos	64
9.3 Participació en projectes.....	66
9.4 Altres.....	67

ÍNDEX DE FIGURES

Figures capítol I

Figura I.1. Emissions anuals de gasos d'efecte hivernacle en Gt CO ₂ eq/any (Període:1970-2010) [2].	1
Figura I.2. Índex de temperatura global de la superfície del planeta i dels oceans [3].	2
Figura I.3. Evolució des de l'any 1970 a 2010 de les emissions de gasos d'efecte hivernacle del sector de al producció d'energia i subsectors [2].	3
Figura I.4. Capacitat instal·lada mundial anual de l'energia solar fotovoltaica per país (Període 2006-2016) [7].	5
Figura I.5. Percentatge de capacitat instal·lada d'energia solar tèrmica per país [9].	6
Figura I.6. Capacitat instal·lada al món en plantes termosolars en operació per país (Període 2006-2016) [7].	8
Figura I.7. Tecnologies disponibles en captació solar per a centrals termosolars. (a) Cilindre parabòlic, (b) torre solar, (c) lent Fresnel i (d) disc parabòlic [14].	9
Figura I.8. Previsió en el consum final d'energia renovable per sector i per tecnologia en el mapa de l'energia renovable de l'any 2050 (REmap 2050, 235 EJ) [5].	10
Figura I.9. Esquema d'un sistema d'emmagatzematge de doble tanc indirecte integrat en una central de cilindre parabòlic [22].	12
Figura I.10. Esquema d'un sistema d'emmagatzematge de doble tanc directe integrat en una central de torre [22].	13
Figura I.11. Reducció del pic en la generació d'energia degut a l'ús del sistema d'emmagatzematge [14].	14

Figures capítol III

Figura III.1. Vista general de la planta pilot de la Universitat de Lleida. (a) Sistema d'escalfament (<i>Electrical heater</i>), (b) sistema de refredament (<i>Air-HTF heat exchanger</i>), (c) tanc calent de sals foses (<i>Hot tank</i>), (d) tanc fred de sals foses (<i>Cold tank</i>), (e) bescanviador de plaques HTF-sals foses (<i>Plate heat</i>	
---	--

exchanger HTF- Molten salt), (f) circuit d'HTF (*HTF loop*), (g) circuit de sals foses (*Molten salt*), (h) sistema d'adquisició i registre de dades (*Acquisition and recording system*), (i) sistema d'emmagatzematge per calor latent (*LTES System*) i (j) sistema d'emmagatzematge per calor sensible (*STES System*) [3].
 21

Figura III. 2. Esquema de la planta pilot de la Universitat de Lleida. 22

Figura III.3. Caldera elèctrica instal·lada a la planta pilot. (a) PLC, (b) resistències elèctriques, (c) vas d'expansió, (d) vàlvules i conductes i (f) bomba d'HTF..... 23

Figura III.4. Bescanviador aire-HTF disponible a la planta pilot. (a) Imatge real i (b) esquema de funcionament..... 24

Figura III.5. Tanc d'emmagatzematge per calor latent disponible a la planta pilot.
 25

Figura III.6. Tanc emmagatzematge per calor sensible en sòlid disponible a la planta pilot..... 26

Figura III.7. Sistema TES de doble tanc operant amb sals foses de la planta pilot. (a) Tanc d'emmagatzematge de sals foses i (b) bescanviador de plaques HTF-sals..... 26

Figura III.8. Comparativa entre un sistema TES doble tanc integrat en una central termosolar de cilindre parabòlic i el sistema TES de la planta pilot de la Universitat de Lleida [3]..... 27

Figura III.9. Esquema simplificat del sistema d'adquisició de dades de la planta pilot..... 27

Figura III.10. Esquema de l'estructura de la present tesi doctoral..... 30

Figures capítol IV

Figura IV.1. Configuració cas d'estudi 1. 33

Figura IV.2. Configuració cas d'estudi 2. 34

Figura IV.3. Configuració cas d'estudi 3. 34

Figures capítol V

Figura V.1. Tancs LTES (a) Sense aletes i (b) amb aletes..... 39



Figura V.2. (a) Fracció de fosa en ambdós tancs pels experiments amb un gradient de temperatura de 145 °C-187°C i (b) fracció de fosa en ambdós tancs pels experiments amb un gradient de temperatura de 130 °C-200°C. 42

Figures capítol VI

Figura VI.1. Modes d'operació del sistema de doble tanc de la planta pilot de la Universitat de Lleida: (a) Càrrega a equicorrent, (b) descàrrega a equicorrent, (c) càrrega a contracorrent i (d) descàrrega a contracorrent. 47

Figures capítol VII

Figura VII.1. Potencial de reducció del LCOE en centrals termosolars 2015-2025. (a) Central de cilindre parabòlic de 160 MW i (b) central de torre solar de 150 MW [5]. 51



ÍNDEX DE TAULES

Taules capítol I

Taula I.2. Característiques representatives de les tecnologies disponibles actualment per a centrals termosolars [15]	9
---	---

Taules capítol V

Taula V.1. Característiques dels experiments realitzats. Rangs de temperatura i cabals.....	40
Taula V.2. Conductivitat tèrmica efectiva del PCM per a cada experiment realitzat.....	42

Taules capítol VI

Taula VI.2. Característiques operacionals dels diferent experiments realitzats. ...	48
---	----

Taules capítol VII

Taula VII.1. Taula comparativa de les propietats del Therminol VP-1 i Syltherm 800 i la seva influència en diversos paràmetres operacionals d'una central termosolar.....	55
---	----

1 Introducció

1.1 Context energètic i mediambiental actual

Durant l'últim segle, l'ús de l'energia ha suposat un factor clau i estratègic en el desenvolupament i progrés de la societat. Però el model de desenvolupament actual, basat en el consum intensiu dels combustibles fòssils, és insostenible i posa en risc el desenvolupament de les generacions futures. Des del 1970 el consum final d'energia al món ha augmentat pràcticament en més del doble [1]. Com també ho han fet les emissions de gasos d'efecte hivernacle. Concretament, entre els anys 2000 i 2010 es va assolir el nivell de creixement anual en les emissions més alt de la història corresponent a 49 Gt CO₂ eq./any (Figura I.1). Contribuint de manera significativa a l'acceleració del canvi climàtic, fent-se evident en l'augment de la temperatura global del planeta (Figura I.2).

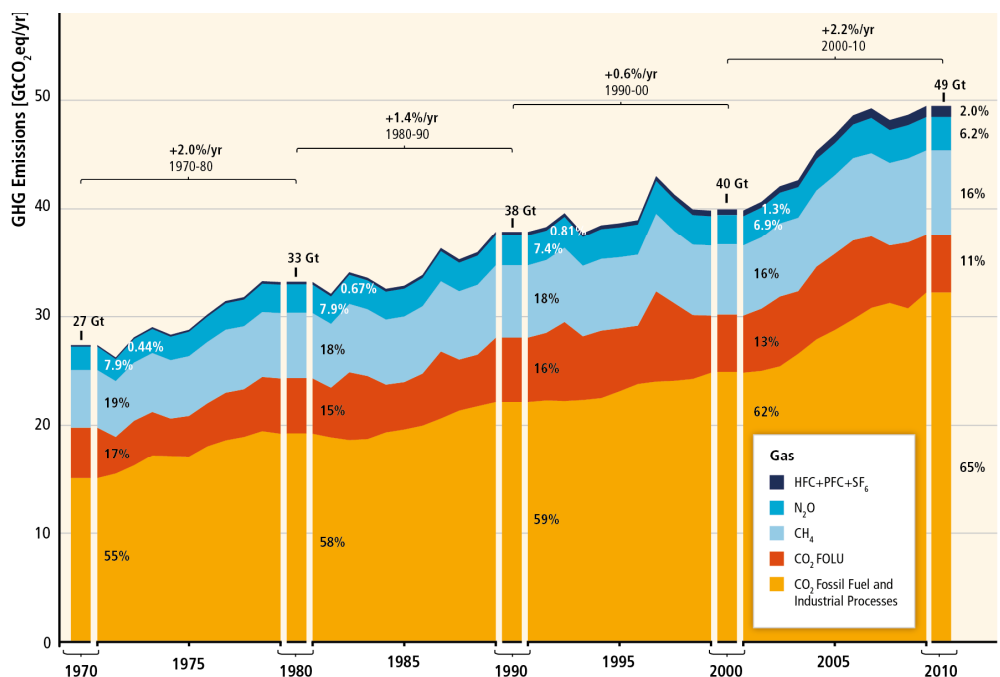


Figura I.1. Emissions anuals de gasos d'efecte hivernacle en Gt CO₂ eq./any (Període:1970-2010) [2].

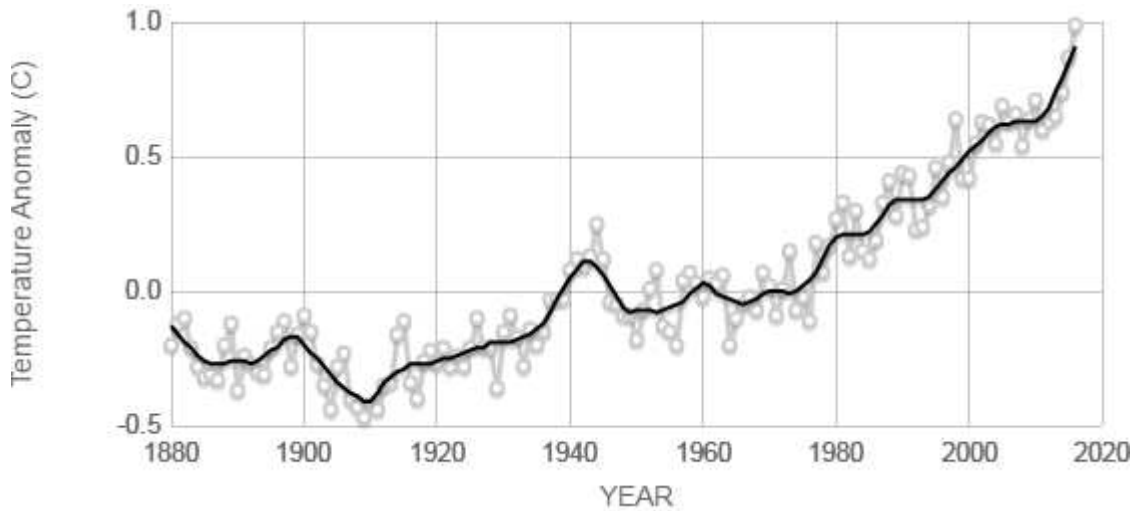


Figura I.2. Índex de temperatura global de la superfície del planeta i dels oceans [3].

Davant d'aquest escenari i del continu creixement en la demanda energètica mundial, l'any 2015 en el marc de la convenció de les Nacions Unides sobre el canvi climàtic celebrada a París, es va establir l'acord de limitar l'augment la temperatura global del planeta per sota dels 2 °C per sobre els nivells pre-industrials a l'any 2050. Segons l'establert per l'agència internacional de l'energia (IEA) en l'informe "*Energy Technology Perspectives 2016*" [4], per tal d'assolir aquest objectiu, és necessari que per l'any 2050 s'assoleixi una reducció del 30% en la demanda d'energia primària al món i del 70% en les emissions de gasos d'efecte hivernacle.

Actualment el sector de la producció d'energia és el màxim contribuent al total de les emissions de gasos d'efecte hivernacle. Concretament, el 2010 va ser responsable del 49% del total de les emissions relatives a l'ús de l'energia al món. I més específicament, el subsector de la producció d'electricitat i calor el qual va aportar el 75% de totes les emissions del sector (Figura I.3). En conseqüència, els últims anys els esforços per combatre el canvi climàtic s'han centrat en el desenvolupament d'un nou model de producció d'energia basat en l'ús de les energies renovables i l'aplicació de mesures d'eficiència energètica.

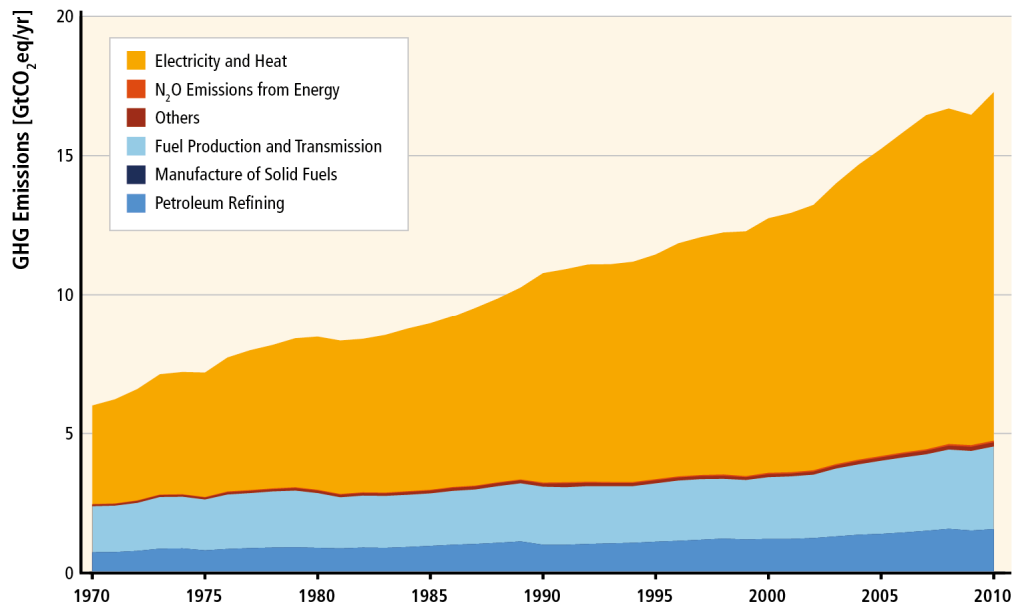


Figura I.3. Evolució des de l'any 1970 a 2010 de les emissions de gasos d'efecte hivernacle del sector de la producció d'energia i subsectors [2].

Segons l'estudi realitzat per l'agència internacional de l'energia renovable (IRENA) "*Perspectives for the energy transition-investment needs for a low-carbon energy System*" [5], en el nou model de producció energètica, el 65% de la demanda d'energia primària al món hauria de ser coberta per fonts d'energia renovable per tal d'assolir la reducció esperada en les emissions per l'any 2050.

És en aquest context, on els últims anys, l'ús de les energies renovables ha despertat un fort interès en diferents països com a eina per lluitar contra el canvi climàtic i alhora per generar nous mercats i proporcionar riquesa. El progrés tecnològic sumat a la creació de polítiques de suport han permès incrementar la competitivitat de les energies renovables respecte l'ús dels combustibles fòssils i per aquest motiu aquestes han experimentat un notable creixement en l'última dècada [6].

Tot i així, l'any 2015, només el 19,3% de l'energia consumida al món va ser d'origen renovable [7]. Per tal d'assolir el 65% requerit a l'any 2050, es fa necessari continuar destinant esforços en fer viable tècnicament i econòmicament les energies renovables. I en especial, l'energia solar i les seves aplicacions.

1.2 Estat actual de la tecnologia solar

L'energia solar es defineix com el flux d'energia en forma de radiació electromagnètica que proporciona el sol a l'atmosfera terrestre. Tot i que una part d'aquest flux es veu atenuat per fenòmens de reflexió i absorció a la pròpia atmosfera, l'energia restant que arriba a la terra continua essent molt elevada (de l'ordre 1000 W/m^2 en dies clars i amb sol pròxim al zenit). Aquesta energia pot ser usada en aplicacions de generació d'electricitat, calor i fred segons tecnologia de conversió de l'energia solar usada en cada cas.

Actualment es poden destacar tres tipus de tecnologies actives de conversió de l'energia solar: la tecnologia fotovoltaica, la tecnologia solar tèrmica per aplicacions de fred i calor i la tecnologia termosolar per la generació d'electricitat.

- Tecnologia solar fotovoltaica

Els sistemes fotovoltaics transformen directament la radiació solar electromagnètica en electricitat mitjançant l'efecte fotoelèctric descobert pel físic Edmond Becquerel l'any 1839.

Els sistema de panells fotovoltaic és extremadament modular i pot ser usat en un gran nombre d'aplicacions incloent des de sistemes residencials a petita escala, fins a sistemes a gran escala com els camps solars de producció elèctrica.

Els últims deu anys, l'aplicació de polítiques efectives d'incentivació sumat al desenvolupament de noves tecnologies, ha permès que l'energia fotovoltaica sigui la tecnologia solar més desenvolupada i la font d'energia renovable que ha experimentat un creixement més elevat. Passant de 6 GW de capacitat instal·lada al món l'any 2007 a 303 GW l'any 2016, representant un 1,5 % de la generació elèctrica global. Tal i com s'observa a la Figura I.4, el mercat actual de la tecnologia fotovoltaica està liderat per la Xina, el Japó juntament amb Alemanya, Regne Unit, Itàlia i els Estat Units.

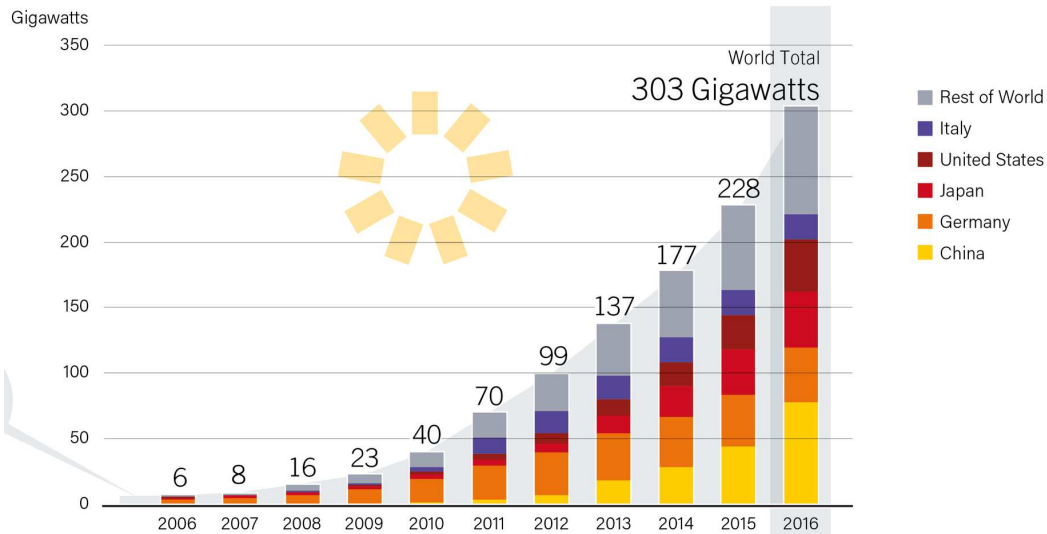


Figura I.4. Capacitat instal·lada mundial anual de l'energia solar fotovoltaica per país (Període 2006-2016) [7].

Actualment es poden destacar tres tipus de tecnologies en energia solar fotovoltaica. La tecnologia de panells de Silici cristal·lí, la qual és la tecnologia més desenvolupada i lidera el mercat amb el 85-90% de capacitat instal·lada. Els panells de capa prima que representen actualment el 10-15% del mercat. I finalment la tecnologia de panells fotovoltaics de concentració, panells de capa prima avançats i cel·les solars orgàniques que es troben en fase de desenvolupament [8].

- Tecnologia solar tèrmica en generació de calor i fred

Els sistemes de conversió de l'energia solar tèrmica transformen la radiació solar en calor o fred. La tecnologia solar tèrmica disposa d'un gran ventall d'aplicacions depenent del rang de temperatura d'operació dels col·lectors solars. Així doncs, es poden tenir aplicacions com la generació d'aigua calenta sanitària, calefacció/refrigeració d'espais, sistemes centralitzats de calefacció/refrigeració urbana i producció de calor, vapor o fred per a processos industrials.

En l'última dècada l'energia solar tèrmica per aplicacions de fred i calor ha resultat una opció atractiva degut a l'augment dels preus de l'energia elèctrica i dels combustibles fòssils. Aquest fet sumat a canvis normatius i a una

disminució dels costos de la tecnologia, n'han provocat la seva expansió. Passant de 126 GW_{th} de capacitat instal·lada al món l'any 2006 a 456 GW_{th} l'any 2016, representant un 0,5% de l'ús directe de l'energia tèrmica global. Actualment consta d'un mercat ampli liderat per la Xina i Europa, seguit dels Estats Units i Canadà (Figura I.5).

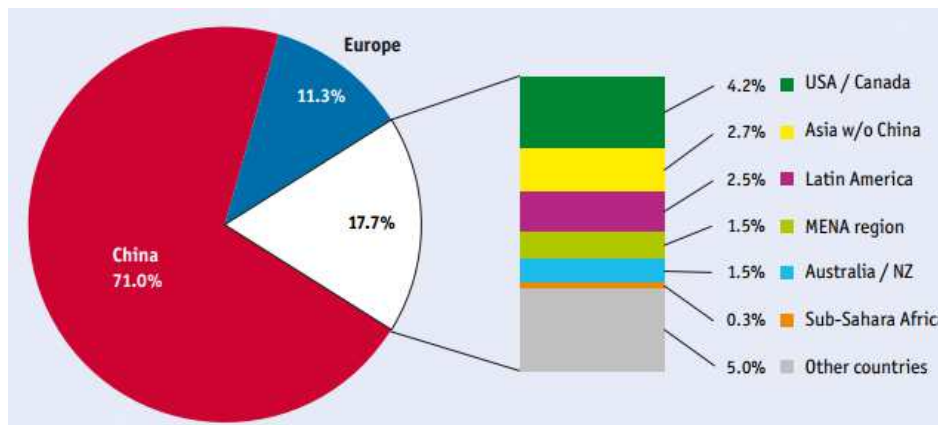


Figura I.5. Percentatge de capacitat instal·lada d'energia solar tèrmica per país [9].

Si s'analitzen en més detall les aplicacions de l'energia solar tèrmica, s'observa que pel que fa a la generació de calor, es disposa de tecnologies extensament estudiades, ja en fase de comercialització, com poden ser les aplicacions de producció d'aigua calenta sanitària o l'escalfament d'aigua per a piscines. El 2015, les aplicacions solars per generació d'aigua calenta sanitària van representar el 91% de tota la capacitat solar tèrmica instal·lada al món. En canvi, aplicacions a gran escala com el sistemes de calefacció centralitzats urbans es troben en un mercat emergent i actualment representen aproximadament el 3% [9].

Per altra banda, el sistemes de fred solar han despertat un fort interès en els últims anys degut als avantatges que suposen respecte la tecnologia de fred convencional. Les aplicacions de fred solar presenten un menor consum, usen refrigerants naturals com l'aigua o l'amoníac i contribueixen a la reducció dels pics d'electricitat produïts en la xarxa per l'increment de la demanda de fred. A més a més, els períodes de màxima demanda de fred coincideixen amb els de màxima radiació solar [10,11].

Recentment, en un estudi realitzat per Grazia (2017) [12], es proporciona un estat de l'art actualitzat de les tecnologies disponibles en fred solar. En aquest estudi es destaca que la majoria de sistemes de fred solar en operació es basen en bombes de calor per absorció de Bromur de Liti/aigua (LiBr/H₂O) o amoníac/aigua (NH₃/H₂O). Alhora que s'estableix que la refrigeració solar és una tecnologia en fase de desenvolupament amb l'existència de diverses plantes pilot amb poca penetració al mercat a nivell comercial.

Actualment el fred solar contribueix en menys d'un 1% a la capacitat instal·lada en energia solar tèrmica al món. I la majoria d'instal·lacions són de petita escala (< 20 kW_{th}) o gran escala (> 350 kW_{th}) i es troben majoritàriament a Europa i als Estats Units [9].

- Tecnologia termosolar per la generació d'electricitat.

Les plantes termosolars produeixen electricitat de la mateixa forma que les plantes convencionals, però amb la radiació solar com a font d'energia. El funcionament d'una planta termosolar és relativament simple: mitjançant un camp de col·lectors solars format per miralls o lents es concentra la radiació solar en un punt on s'escalfa un fluid de treball o caloportador (HTF) fins a la temperatura d'operació de la planta. Posteriorment aquest fluid és transportat a una sèrie de bescanviadors de calor on s'obté vapor sobreescalfat a alta pressió per ser utilitzat en una turbina, on finalment s'obté energia mecànica i posteriorment elèctrica.

Les primeres plantes termosolars a nivell comercial van començar a operar entre el 1984 i el 1991 al sud de Califòrnia. Per tant, es tracta d'una tecnologia provada comercialment amb aproximadament 30 anys d'experiència. Però no ha estat fins l'última dècada que la tecnologia termosolar ha experimentat un notable creixement. Passant de menys de 500 MW de capacitat instal·lada al món l'any 2006 a 4,8 GW l'any 2016. Contribuint en menys d'un 0,4% a la producció d'energia elèctrica global. Com es pot observar a la Figura I.6, Espanya lidera el mercat amb una capacitat instal·lada en operació corresponent a 2,3 GW, seguit dels Estats Units amb 1,76 GW. A més a més, es tracta d'un mercat emergent que continua creixent ja que actualment es

troben en construcció 1,78 GW en diverses regions del món [13].

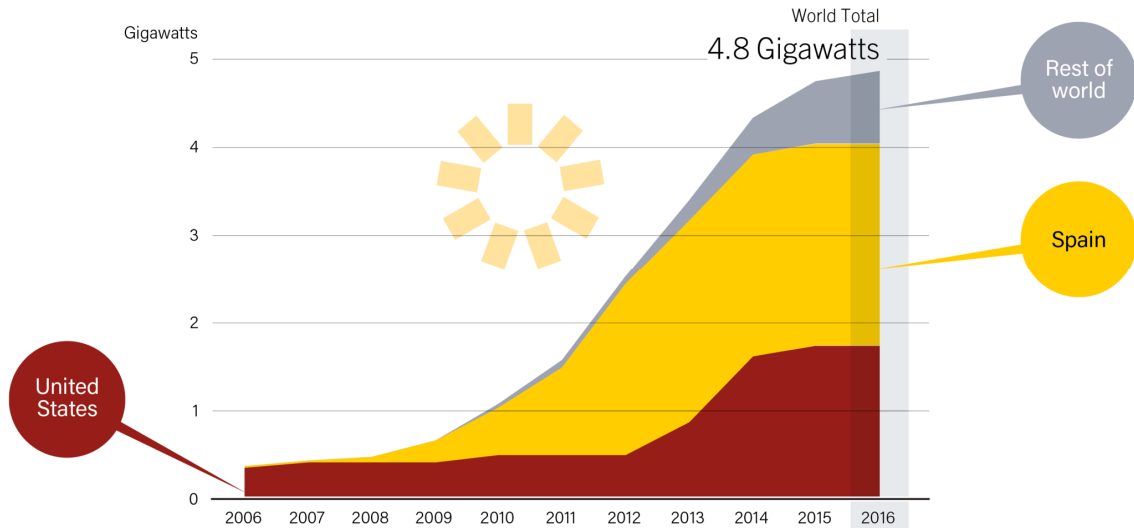


Figura I.6. Capacitat instal·lada al món en plantes termosolars en operació per país (Període 2006-2016) [7].

Pel que fa a la tecnologia disponible actualment en les plantes termosolars, operatives i en construcció, es poden destacar quatre grups tecnològics diferents: centrals de cilindre parabòlic, centrals de torre, centrals de lent Fresnel i centrals de disc parabòlic. A la Figura I.7 es pot veure un esquema gràfic de cada tecnologia.

Actualment la tecnologia més desenvolupada a nivell comercial és la de cilindre parabòlic amb una alta penetració al mercat present en el 81% de les plantes operatives. Seguidament es destaquen les centrals de torre recentment provades a nivell comercial amb una representació al mercat actual aproximadament del 14%. Pel que fa a les centrals de lent Fresnel es troben en fase desenvolupament a escala de planta pilot i en projectes a escala comercial en construcció. Mentre que les centrals de disc parabòlic es troben en la fase de demostració. A la Taula I.1 es poden veure les característiques tècniques representatives de cada tecnologia descrita.

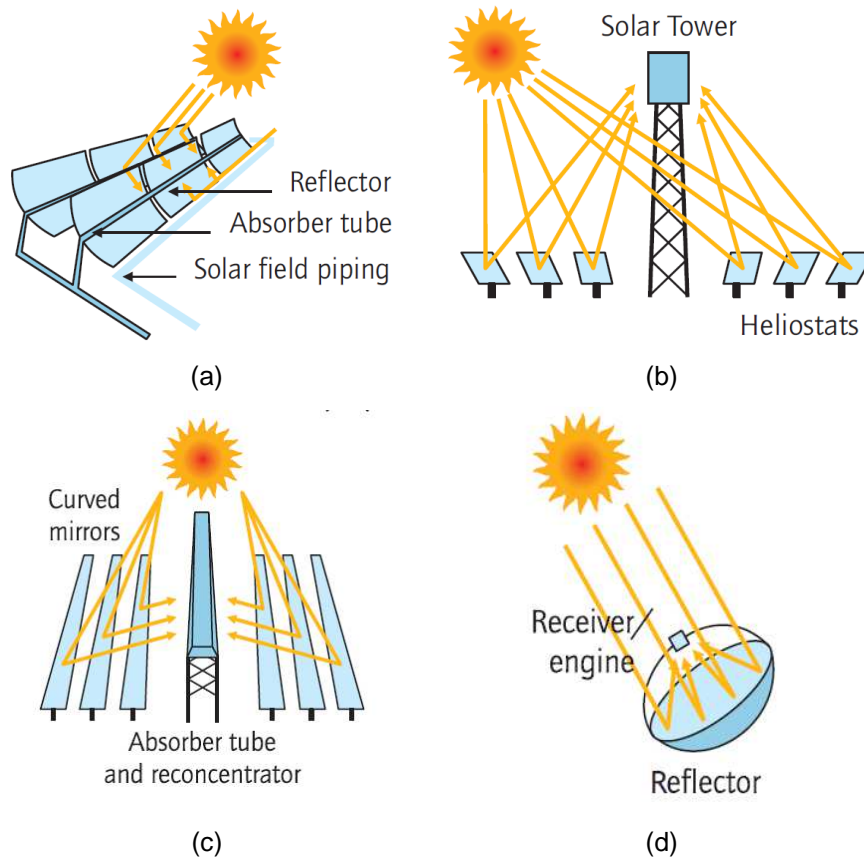


Figura I.7. Tecnologies disponibles en captació solar per a centrals termosolars. (a) Cilindre parabòlic, (b) torre solar, (c) lent Fresnel i (d) disc parabòlic [14].

Taula I.1. Característiques representatives de les tecnologies disponibles actualment per a centrals termosolars [15].

	Current trough	Current tower	Current linear Fresnel	Current dish
Maturity	High, commercially proven	Medium, recently commercially proven	Medium, pilot plants, commercial projects under construction	Low, demonstration projects
Typical plant capacity	100 (MW)	50-100 (MW)	50 (MW)	3-30 each (kW)
Operating temperature of solar field (°C)	290-390	290-565	250-390	550-750
Plant peak efficiency (%)	14-20	23-35	18	31.25
Annual average conversion efficiency (%)	13-15	14-18	9-13	22-24
Collector concentration (suns)	70-80	> 1000	> 60 (depends on secondary reflector)	> 1300
Power block cycle and fluid conditions	Superheated steam Rankine, steam @380 °C/100 bar	Superheated steam Rankine, steam @ 540 °C/100-160 bar	Saturated steam Rankine (steam @ 270 °C/55 bar), superheated steam Rankine (steam @ 380 °C/50 bar)	Stirling/Brayton
Power cycle efficiency (%)	37.7	41.6	-	-
Heat transfer fluid	Synthetic oil, water/steam (DSG), molten salt (demonstration), air (demonstration)	Water/steam, molten salt, air (demonstration)	Water/steam	Air, hydrogen, helium
Annual capacity factor (%)	20-25 (no TES) 40-53 (6 h TES)	40-45 (6-7.5 h TES) 65-80 (12-15 h TES)	22-24	~25
Storage system	Indirect two-tank molten salt storage (293-393 °C)	Direct two-tank molten salt storage (290-565 °C)	Short-term pressurized water storage (Ruths tank)	No storage for Stirling dish, chemical storage under development
Capital cost (USD/kW)	4700-7300 (no TES, OECD countries) 3100-4050 (no TES, non-OECD countries) 6400-10,700 (with TES)	6400-10,700 (with TES)	-	-
LCOE (USD/kW h)	0.26-0.37 (no TES) 0.22-0.34 (with TES)	0.2-0.29 (6-7.5 h TES) 0.17-0.24 (12-15 h TES)	0.19-0.38 (no TES) 0.17-0.37 (6 h TES)	-
Cooling method	Wet	Wet, dry	Dry	Dry
Suitable for air cooling	Low to good	Good	Good	Best
Water requirement (m ³ /MW h)	3 (wet) 0.4-1.7 (hybrid) 0.3 (dry)	1.8-2.8 (wet) 0.3-1 (hybrid) 0.3 (dry)	3.8 (wet)	~0.08 (mirror washing)

Finalment, tal i com s'ha pogut comprovar, l'energia solar és el recurs energètic més abundant i accessible en tot el planeta i disposa d'un gran ventall d'aplicacions disponibles per satisfer de manera sostenible i segura gran part de les necessitats energètiques actuals. Alhora que posseeix diverses tecnologies a diferents nivells de desenvolupament en un mercat clarament en expansió. Per aquest motiu, tot i que en l'actualitat la seva contribució al consum global d'energia renovable és menor d'un 4%, el seu desenvolupament a escala mundial esdevindrà clau en la lluita contra el canvi climàtic en les pròximes dècades. Passant a contribuir un 29% l'any 2050 (Figura I.8) i convertint-se així en la font d'energia renovable amb més contribució.

No obstant, en l'actualitat, la dependència de la tecnologia solar amb el clima la converteix en un recurs intermitent i constitueix la principal barrera tecnològica que en limita el seu desenvolupament. És en aquest context, on l'emmagatzematge d'energia resulta una opció atractiva per solucionar aquest desavantatge. En especial l'emmagatzematge d'energia tèrmica per aplicacions de fred solar i per centrals termosolars, tema principal en que es centra aquesta tesi.

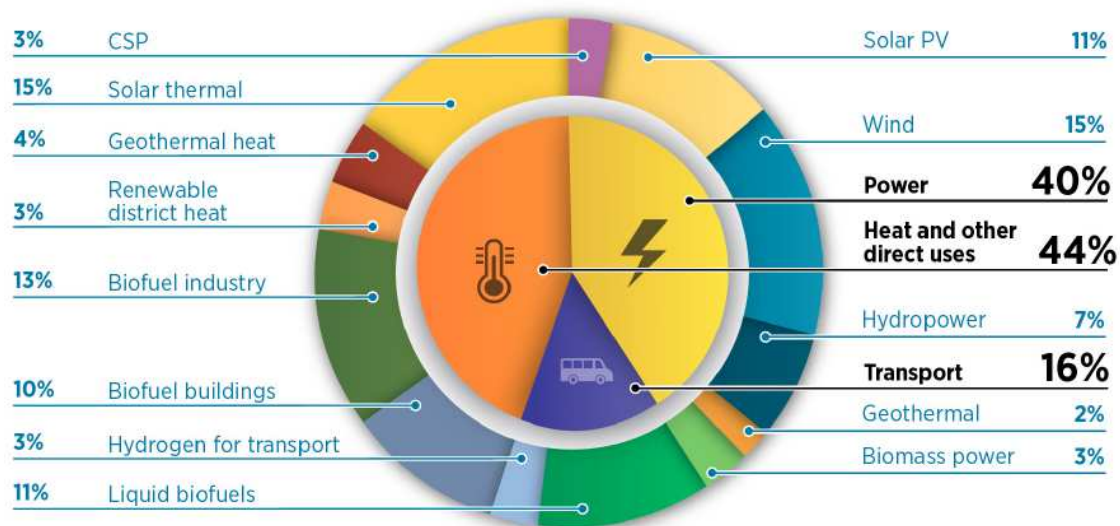


Figura I.8. Previsió en el consum final d'energia renovable per sector i per tecnologia en el mapa de l'energia renovable de l'any 2050 (REmap 2050, 235 EJ) [5].

1.3 L'emmagatzematge d'energia tèrmica per aplicacions de fred solar i per centrals termosolars

Els sistemes d'emmagatzematge d'energia tèrmica (TES) per aplicacions de fred solar o per centrals termosolars permeten emmagatzemar l'energia tèrmica que no és demandada per ser utilitzada en posterioritat.

Bàsicament es destaquen tres tecnologies TES segons el mecanisme utilitzat per emmagatzemar l'energia: emmagatzematge d'energia tèrmica per calor sensible (STES), per calor latent (LTES) o mitjançant reaccions químiques reversibles [16]. Els materials d'emmagatzematge disponibles, així com els requeriments tècnics del sistema TES i les seves possibles aplicacions per cada una de les tecnologies descrites, han estat extensament estudiades els últims anys [17-20].

En particular, per aplicacions de fred solar, la selecció del tipus d'emmagatzematge depèn del sistema de fred en que va integrat. Més concretament del rang de temperatura d'operació del generador de la màquina d'absorció, el qual pot variar entre 65 °C i 95 °C i entre 150 °C i 200 °C, segons si el sistema de fred és de simple efecte o de doble efecte. La major part dels sistemes TES integrats en sistemes de fred solar operatius actualment, són sistemes STES. Però aquests tipus de sistemes, requereixen grans volums per proporcionar la suficient energia al generador de la màquina d'absorció. Aquest fet incrementa els costos de la instal·lació i l'espai a ocupar. Per altra banda els sistemes LTES permeten emmagatzemar una major quantitat d'energia en un volum menor degut a les altes entalpies dels materials de canvi de fase (PCM). I al mateix temps proporcionen un comportament isotèrmic durant la descàrrega [21]. Fets que redueixen els costos de la instal·lació i optimitzen l'eficiència del generador. Però com a inconvenient, els sistemes LTES presenten ratis de transferència de calor molt baixos degut a les baixes conductivitats dels PCMs (entre 0,2 i 0,7 W/m·K) limitant així la seva aplicabilitat. Per tant, es fa necessari el desenvolupament de tècniques de millora de la transferència de calor en sistemes LTES per fer viable la seva integració en aplicacions de fred solar.

Pel que fa a la tecnologia termosolar, aproximadament un 36% de la potència termosolar instal·lada al món prové de plantes en operació que incorporen el sistema TES. Mentre que el percentatge de plantes que es troben en construcció i que disposen de sistema TES és lleugerament superior al 80% de la capacitat instal·lada [15].

La majoria de sistemes TES instal·lats en plantes termosolars comercials són sistemes actius per calor sensible. Aquests sistemes impliquen la convecció forçada com a mecanisme de transferència de calor en el material d'emmagatzematge i es classifiquen en sistemes actius directes o indirectes, segons si l'HTF provinent del camp solar s'usa directament com a material d'emmagatzematge o si l'HTF i el material d'emmagatzematge són diferents [22]. El sistema més desenvolupat i utilitzat en plantes termosolars actualment és el sistema TES actiu de doble tanc (Figura I.9 i Figura I.10). Aquest sistema utilitza com a material d'emmagatzematge una mescla eutèctica formada per un 60 wt. % de NaNO_3 i el 40 wt. % en pes de KNO_3 que s'emmagatzema en dos tancs anomenats tanc fred i calent segons el seu nivell tèrmic. Les temperatures d'emmagatzematge solen ser estar en un rang de 292 °C a 385 °C per sistemes TES integrats en plantes de cilindre parabòlic i poden arribar fins a temperatures de 565 °C en centrals termosolars de torre.

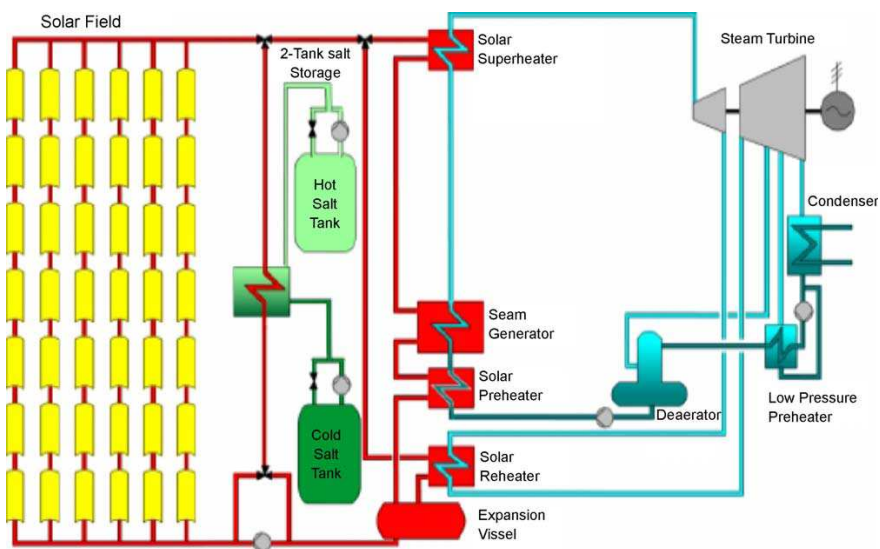


Figura I.9. Esquema d'un sistema d'emmagatzematge de doble tanc indirecte integrat en una central de cilindre parabòlic [22].

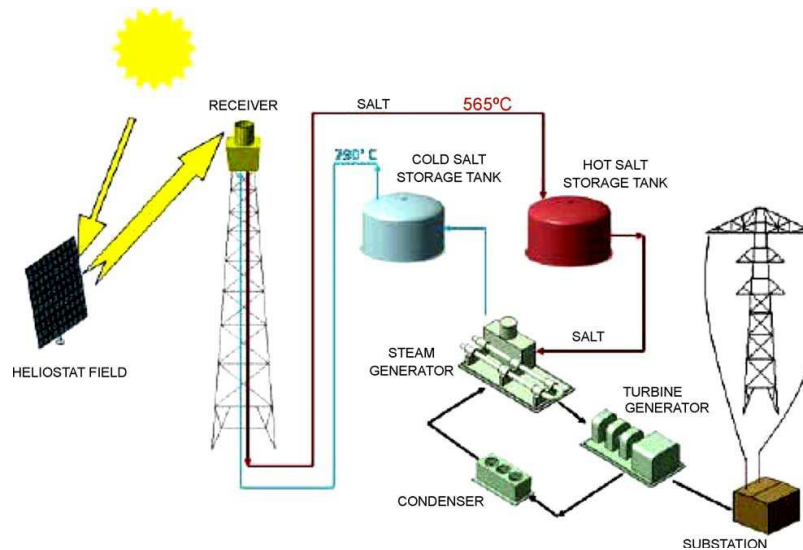


Figura I.10. Esquema d'un sistema d'emmagatzematge de doble tanc directe integrat en una central de torre [22].

El funcionament d'aquest sistema és relativament senzill: durant el procés de càrrega les sals provinents del tanc fred són escalfades per l'HTF a través d'un bescanviador de calor o directament, segons si es tracta d'un sistema indirecte o directe. Un cop escalfades, les sals s'emmagatzemen al tanc calent a la màxima temperatura d'operació. Quan l'energia emmagatzemada es requerida, s'inicia el procés de descàrrega i el sistema TES opera a la inversa.

1.4 Avantatges e inconvenients de l'emmagatzematge d'energia tèrmica

Els sistemes TES poden ser integrats en aplicacions de fred solar o en centrals termosolars atenent a diversos avantatges derivats del seu ús [21,23]:

- Els equips consumidors de l'energia solar requereixen d'un subministrament d'energia en estat estacionari per tal de no perdre eficiència. En moments transitoris en la radiació solar provocats per inclemències del temps, els sistemes TES poden reduir l'efecte de les fluctuacions de la radiació solar en l'equip consumidor.
- Els sistemes TES poden contribuir a reduir els pics en la generació d'energia. A més a més, milloren la flexibilitat i adaptació del sistema

solar a canvis en la demanda o canvis normatius. Per exemple, en plantes termosolars es pot emmagatzemar energia en les hores de menor demanda (al matí) per ser usada en hores on la demanda elèctrica és major i on les tarifes són més elevades (Figura I.11).

- Mitjançant els sistemes TES s'incrementa el factor de capacitat de la planta solar ja que permet seguir funcionant quan la radiació solar no està disponible.
- Els sistemes TES en aplicacions de fred solar incrementen la capacitat de refrigeració del sistema de fred i augmenten la contribució de l'energia solar al consum energètic total de l'edifici.

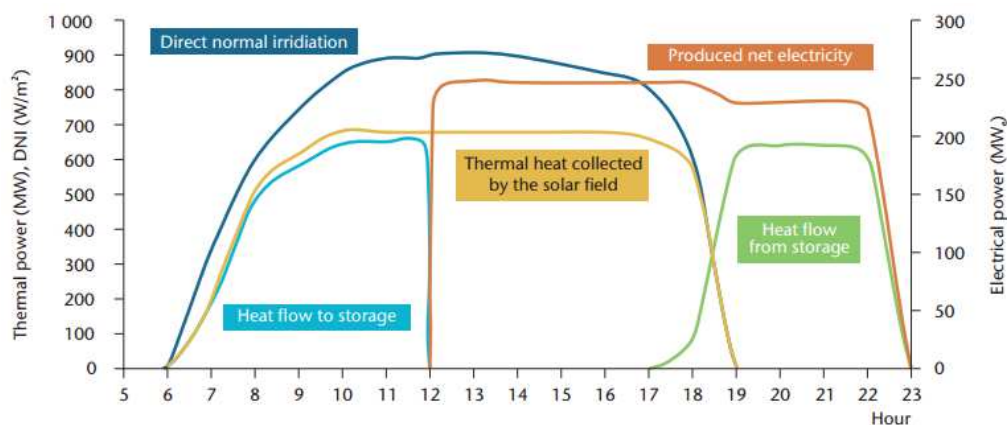


Figura I.11. Reducció del pic en la generació d'energia degut a l'ús del sistema d'emmagatzematge [14].

Per altra banda, la integració de sistemes TES en aquest tipus d'aplicacions presenta alguns desavantatges com l'augment dels costos d'inversió de la instal·lació, l'increment de pèrdues energètiques per pèrdues tèrmiques en la instal·lació, així com l'augment en el consum de l'equipament auxiliar necessari com bombes, tracejats elèctrics, etc.

Un cop descrites les tecnologies disponibles en emmagatzematge d'energia per aplicacions de fred solar i centrals termosolars, així com els avantatges i inconvenients que suposa la seva utilització, es fa evident que el sistema TES és un element crucial pel desenvolupament i viabilitat de les tecnologies de fred solar i termosolar. Per aquest motiu es fan necessàries línies de recerca en el



desenvolupament de nous sistemes TES, nous materials, noves estratègies d'operació e integració dels sistemes TES amb el camp solar, bloc de potència o sistema d'absorció que permetin millorar l'eficiència i reduir el volum del sistema TES i per tant, reduir-ne els costos fixes d'inversió i els costos d'operació.

1.5 Referències

- 1 IEA (2016a), Key world energy statistics. IEA/OECD, Paris.
- 2 IPCC, 2014: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 3 NASA's Goddard Institute for Space Studies (GISS). <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/> [Accessed: 08/06/2017]
- 4 IEA (2016b), Energy Technology Perspectives 2016. Towards Sustainable Urban Energy. IEA/OECD, Paris.
- 5 IRENA (2017a), Perspectives for the energy transition-investment needs for a low-carbon energy system. International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi.
- 6 IRENA (2017b), Renewable capacity statistics 2017. International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi.
- 7 REN21. 2017. Renewables 2017 Global Status Report (Paris: REN21 Secretariat).
- 8 Lupangu C, Bansal RC. A review of technical issues on the development of solar photovoltaic Systems. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 2017;73:950-965.
- 9 IEA-Solar Heating & Cooling Programme (2017), Solar Heat Worldwide. Global Market Development and Trends in 2016. Detailed Market Figures 2015. Institute for Sustainable Technologies (AEE INTEC), Austria.
- 10 Henning HM. Solar-assisted air-conditioning in buildings. A handbook for planners. Ed. Springer, Wien (2004).
- 11 IEA (2012), Technology Roadmap, Solar heating and cooling roadmap. IEA/OECD, Paris.
- 12 Grazia L. Solar Systems integrated with absorption Systems heat pumps and

- thermal energy storages: State of the art. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 2017; 70:792-505.
- 13 https://www.nrel.gov/csp/solarpaces/projects_by_status.cfm?status=Under%20Construction [Accessed: 21/06/2017]
 - 14 IEA (2012), *Technology Roadmap, Solar Thermal electricity*. IEA/OECD, Paris.
 - 15 Liu M, Tay NHS, Bell S, Belusko M, Jacob R, Will G, Saman W, Bruno F. Review on concentrating solar power plants and new developments in high temperature thermal energy storage technologies. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 2016; 53:1411-1432.
 - 16 Cabeza LF, Sole C, Castell A, Oró E, Gil A. Review of solar thermal storage techniques and associated heat transfer technologies. *Proceedings of the IEEE* 2012;100(2):525-38.
 - 17 Zalba B, Marin JM, Cabeza LF, Mehling H. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Appl. Therm. Eng.* 2003;23:251-83.
 - 18 Fernandez AI, Martinez M, Segarra M, Martorell I, Cabeza LF. Selection of materials with potential in sensible thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2010;94:1723-1729.
 - 19 Solé A, Fontanet X, Barreneche C, Fernández AI, Martorell I, Cabeza LF. Requirements to consider when choosing a thermochemical material for solarenergy storage. *Sol Energy* 2013;97:398-404.
 - 20 Gasia J, Miró L, Cabeza LF. Review on system and materials requirements for high temperature thermal energy storage. Part 1: General requirements, *Renew Sustain. Energy Rev.* 2017;75:1320-1338.
 - 21 Pintaldi S, Perfumo C, Sethuvenkatraman S, White S, Rosengarten G. Review of thermal energy storage technologies and control approaches for soalr cooling. *Renew. Sust. Energ. Rev* 2015; 41:975-995.
 - 22 Gil A, Medrano M, Martorell I, Lázaro A, Dolado P, Zalba B, Cabeza LF. State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1-Concepts, materials and modellization. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2010;14:31–55.



- 23 Kuravi S, J. Trahan J, Goswami DY, Rahman MM, Stefanakos EK. Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants. Prog. Energ. Combust. 2013;39:285-319

2 Objectius

El principal objectiu d'aquesta tesi doctoral és desenvolupar, caracteritzar i demostrar la fiabilitat de diferents sistemes d'emmagatzematge d'energia tèrmica per aplicacions d'alta temperatura a través del seu estudi a escala de planta pilot (>100 kg) com a pas previ al seu desenvolupament comercial.

Per tal de complir amb l'objectiu principal de la present tesi, es contemplen els següents objectius específics:

- Dissenyar i construir sistemes TES per aplicacions de fred solar i generació elèctrica en centrals termosolars per poder ser provats a escala de planta pilot.
- Testejar components, materials, noves configuracions i noves estratègies d'operació dels diferents sistemes TES construïts, sota les mateixes condicions que es donarien en aplicacions reals.
- Analitzar els resultats obtinguts en l'experimentació a través de l'estudi dels següents paràmetres del sistema TES:
 - Perfils de temperatura.
 - Potència cedida/acumulada pel material d'emmagatzematge i per l'HTF.
 - Energia cedida/acumulada pel material d'emmagatzematge i per l'HTF.
 - Pèrdues tèrmiques del sistema.
 - Eficiència tèrmica.
 - Efectivitat del sistema (*Effectiveness*).

3 Metodologia i estructura de la tesi doctoral

En aquesta secció d'aquesta tesi es presenta una descripció de la instal·lació experimental usada per dur a terme els diferents estudis que s'hi inclouen i alhora també es mostra l'estructura seguida per l'elaboració d'aquesta tesi doctoral.

3.1 Descripció de la planta pilot experimental

La planta pilot usada per la realització de la recerca mostrada en la present tesi, va ser dissenyada i construïda l'any 2008 a la Universitat de Lleida amb la col·laboració industrial de l'empresa Abengoa.

La present planta va ser projectada a escala de demostració, per tal de simular el comportament de la tecnologia TES el més pròxim a la realitat possible. Mitjançant l'ús de plantes pilot a escala de demostració, es poden observar, errors, comportaments dels materials derivats de l'escalat de la tecnologia [1], així com aspectes com el comportament de la instrumentació i control, compatibilitat de materials que en models numèrics o experimentació a petita escala no poden ser simulats o observables. Permetent així, una reducció dels costos de la tecnologia i assegurar-ne la seva fiabilitat a escala comercial.

El disseny de la present planta s'emmarca dins la metodologia *Technology Readiness level scale* (TRL), presentada per *Horizon 2020 work programme 2014-2015*, per avaluar la maduresa d'una tecnologia i determinar les inversions en recerca i desenvolupament [2]. Més concretament la planta pilot de la Universitat de Lleida es situa entre els nivells que es defineixen en la mateixa metodologia com TRL4-Validació de la tecnologia a nivell analític i experimental a escala de laboratori i TRL5-Validació de la tecnologia en entorn rellevant.

La planta pilot de la Universitat de Lleida, està integrada principalment per diferents sistemes i components per tal de poder simular les condicions d'operació reals de càrrega i descàrrega dels diferents sistemes TES per les aplicacions anteriorment esmentades (Figura III.1 i Figura III. 2). Les funcions de cada sistema, així com l'experiència adquirida durant el disseny,

construcció, posta en marxa i operació de la planta pilot de la Universitat de Lleida, es mostren en detall en dos estudis realitzats per l'autor de la present tesi [3,4]. El qual n'ha estat el tècnic responsable del seu funcionament i manteniment des de l'any 2010.

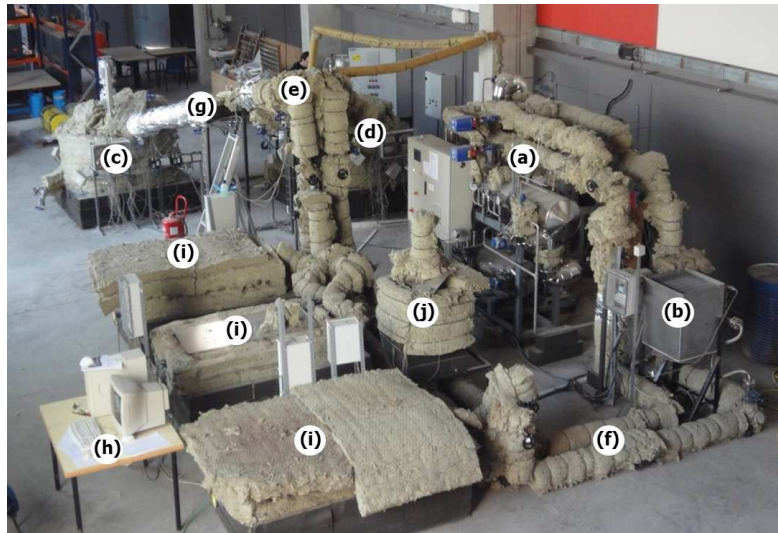


Figura III.1. Vista general de la planta pilot de la Universitat de Lleida. (a) Sistema d'escalfament (*Electrical heater*), (b) sistema de refredament (*Air-HTF heat exchanger*), (c) tanc calent de sals foses (*Hot tank*), (d) tanc fred de sals foses (*Cold tank*), (e) bescanviador de plaques HTF-sals foses (*Plate heat exchanger HTF-Molten salt*), (f) circuit d'HTF (*HTF loop*), (g) circuit de sals foses (*Molten salt*), (h) sistema d'adquisició i registre de dades (*Acquisition and recording system*), (i) sistema d'emmagatzematge per calor latent (*LTES System*) i (j) sistema d'emmagatzematge per calor sensible (*STES System*) [3].

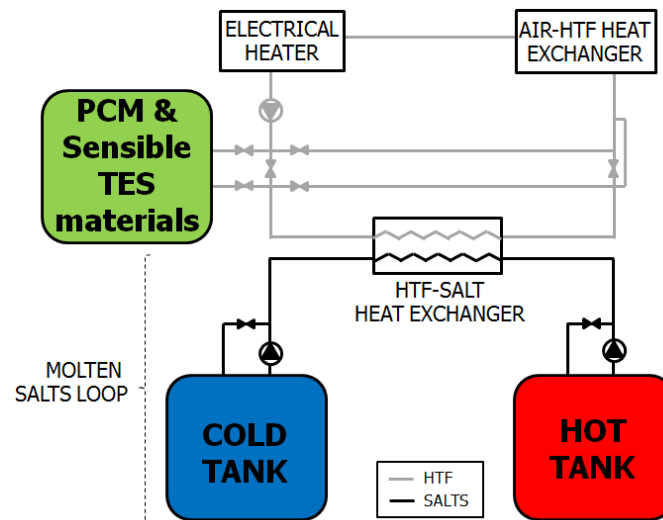


Figura III. 2. Esquema de la planta pilot de la Universitat de Lleida.

No obstant, a continuació es realitza un resum dels sistemes principals que integren la planta pilot i la funció que realitzen .

- Sistema d'escalfament o *electrical heater*.

Es tracta d'una caldera elèctrica tipus CE-22 HT subministrada per l'empresa PIROBLOC (Espanya) (Figura III.3). La seva funció principal és la d'escalfar l'HTF a través de resistències elèctriques, controlar-ne la seva temperatura i bombejar-lo a través del circuit d'HTF on es troben connectats els sistemes TES.

Aquest sistema simula la font d'energia subministrada al sistema TES durant la càrrega. Per exemple, en el cas d'aplicacions de fred solar o centrals termosolars comercials, aquest funció és la que es compleix mitjançant el camp solar.

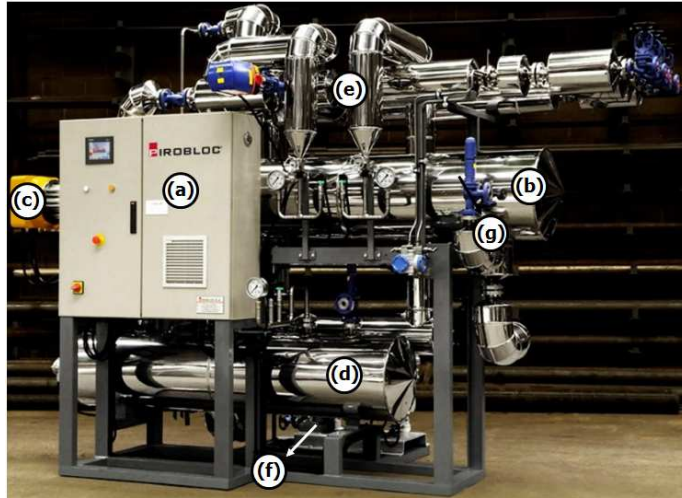


Figura III.3. Caldera elèctrica instal·lada a la planta pilot. (a) PLC, (b) tanc d'HTF, (c) resistències elèctriques, (d) vas d'expansió, (e) vàlvules i conductes *by-pass*, (f) bomba d'HTF i (g) vàlvula de seguretat.

- Sistema de refredament o *Air-HTF heat exchanger*.

Consisteix en un bescanviador de calor aire-HTF de 20 kW_{th} de potència de refredament (Figura III.4a). Aquest bescanviador va ser dissenyat i construït per la Universitat de Lleida. El disseny d'aquest sistema es basa en un bescanviador de calor compacte de flux creuat. Bàsicament es tracta d'un conducte rectangular amb un conjunt d'aletes i tubs disposats en ziga-zaga a l'interior per on circula l'HTF i on l'intercanvi de calor es realitza circulant aire a temperatura ambient amb un ventilador a través del conjunt d'aletes i tubs (Figura III.4b).

Aquest sistema simula el consum final d'energia durant la descàrrega del sistema TES. En aplicacions de fred solar o termosolar aquesta funció la realitza el generador de màquina d'absorció o el bloc de potència de la central termosolar, respectivament.

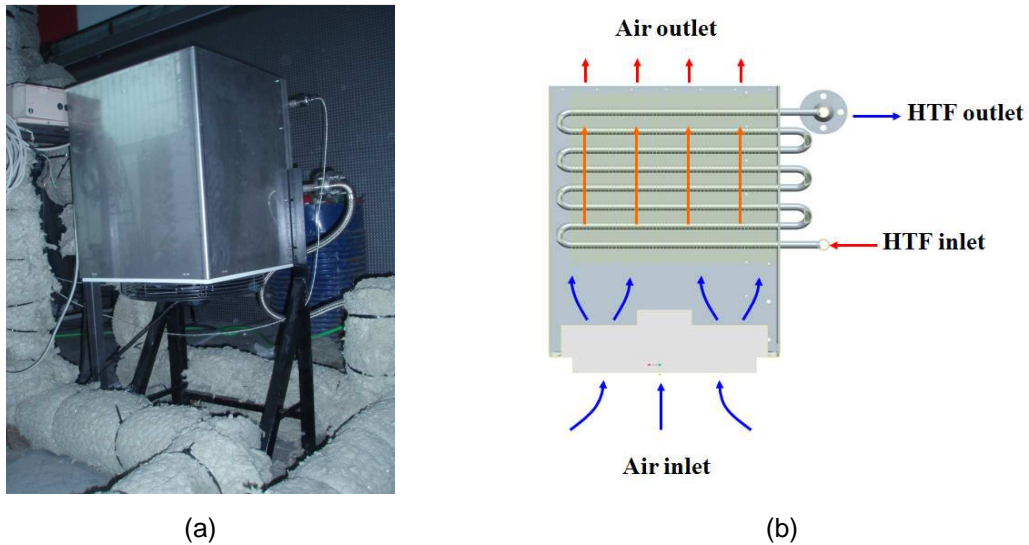


Figura III.4. Bescanviador aire-HTF disponible a la planta pilot. (a) Imatge real i (b) esquema de funcionament.

- Sistemes d'emmagatzematge per calor latent:

Pel que fa al sistema d'emmagatzematge per calor latent, es van dissenyar tres tancs geomètricament idèntics basats en el concepte d'un bescanviador de calor de carcassa i tubs. Es tracta bàsicament de tancs amb la carcassa en forma rectangular amb un feix de tubs el seu interior. El PCM es situa en l'espai comprés entre els tubs i la carcassa i l'HTF circula per 49 tubs distribuïts en quadrat mitjançant dos passos de tub en "U" (Figura III.5). Un d'aquests tancs es va construir amb 196 aletes quadrades distribuïdes transversalment al llarg del feix de tubs per tal de poder estudiar la seva influència en els ratis de transferència de calor entre l'HTF i el PCM.

Bàsicament aquests tancs han estat utilitzats per testejar i caracteritzar el comportament de sistemes LTES mitjançant l'ús de PCMs per aplicacions de fred solar (rangs de temperatura entre 150 i 200 °C). Així com per avaluar la millora de la transferència de calor entre el PCM i l'HTF pel fet d'incloure aletes en el disseny del tanc.



Figura III.5. Tanc d'emmagatzematge per calor latent disponible a la planta pilot.

- Sistema d'emmagatzematge per calor sensible en fase sòlida:

Es tracta d'un tanc basat en el concepte d'un bescanviador de carcassa tubs amb una carcassa quadrada i un feix de quatre tubs disposats en vertical (Figura III.6). El material d'emmagatzematge es situa a l'espai comprés entre el feix de tubs i la carcassa i l'HTF circula pels tubs, a l'igual que en tancs d'emmagatzematge per calor latent.

Aquest tanc ha estat utilitzat per experimentar en sistemes d'emmagatzematge per calor sensible en sòlid per aplicacions de recuperació de calor residual industrial.

- Sistema d'emmagatzematge per calor sensible en fase líquida:

Es tracta d'un sistema d'emmagatzematge indirecte de doble tanc operant amb sals foses per centrals termosolars de 0,33 MWh de capacitat d'emmagatzematge. Consta bàsicament de dos tancs d'emmagatzematge idèntics anomenats tanc calent i fred degut a la temperatura en que emmagatzemen les sals. Aquests tancs estan connectats a través d'un circuit de canonades per on circulen les sals connectades a un intercanviador de calor de plaques responsable de l'intercanvi de calor entre l'HTF i les sals (Figura III.7a i Figura III.7b). El disseny del tancs consisteix en un recipient en forma de cilíndrica, on s'ubiquen les sals amb una tapa *Klöpper* soldada a la part superior. Tant les parets dels tancs com la tapa, incorporen diverses obertures per la instal·lació de les resistències elèctriques per escalfar les sals i per la

instrumentació i equipament auxiliar necessari pel funcionament del sistema, tals com bombes, mesuradors de nivell, sondes de temperatura, etc. Tots dos tancs es van dissenyar amb la mateixa relació d'aspecte (relació entre la altura i el diàmetre del tanc) que els tancs d'emmagatzematge disponibles en plantes comercials.



Figura III.6. Tanc emmagatzematge per calor sensible en sòlid disponible a la planta pilot.



(a)



(b)

Figura III.7. Sistema TES de doble tanc operant amb sals foses de la planta pilot. (a) Tanc d'emmagatzematge de sals foses i (b) bescanviador de plaques HTF-sals.

A la Figura III.8 es pot veure una comparativa entre els esquemes d'un sistema TES de doble tanc integrat en una central solar de cilindre parabòlic i el sistema TES de doble tanc que es disposa a la Universitat de Lleida.

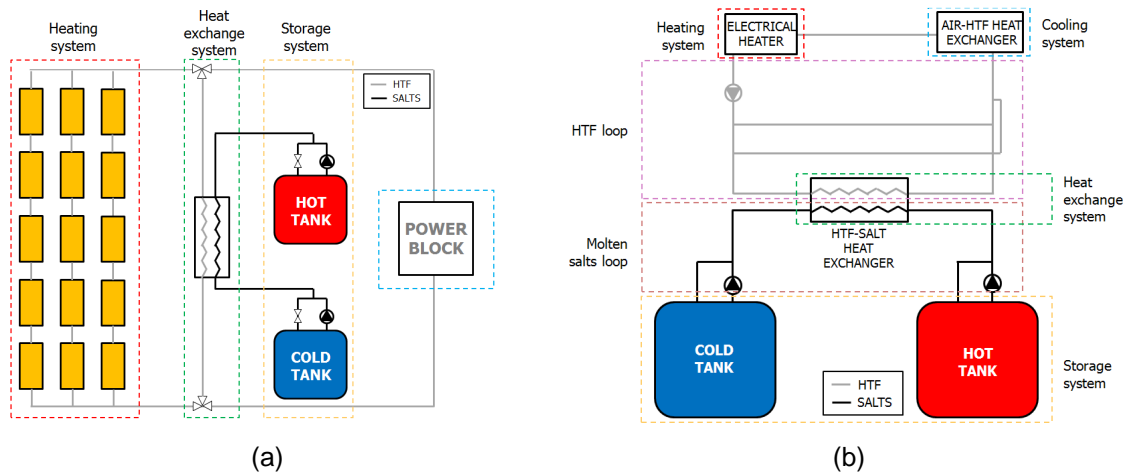


Figura III.8. Comparativa entre un sistema TES doble tanc integrat en una central termosolar de cilindre parabòlic (a) i el sistema TES de la planta pilot de la Universitat de Lleida (b) [3].

- Sistema d'instrumentació i adquisició de dades

Com es podrà observar en altres capítols de la present tesi, tots els sistemes anteriorment descrits incorporen tota una sèrie d'instrumentació tals com sensors de temperatura (Pt-100), cabalímetres, sensors de nivell de sals mecànic i per radar i sensors de pressió d'HTF i de sals. Per una banda, aquest sensors estan situats en llocs estratègics de la instal·lació per tal d'assegurar una correcta operació i control de la mateixa, però per altra banda també per tal d'obtenir dades suficients del funcionament i comportament dels diferents sistemes exposats pel seu posterior anàlisi.

Totes les dades obtingudes pel sistema d'instrumentació es registren al sistema d'adquisició de dades mitjançant l'ús de *data loggers* connectats en sèrie amb un ordinador mitjançant una connexió RS-485 (Figura III.9)

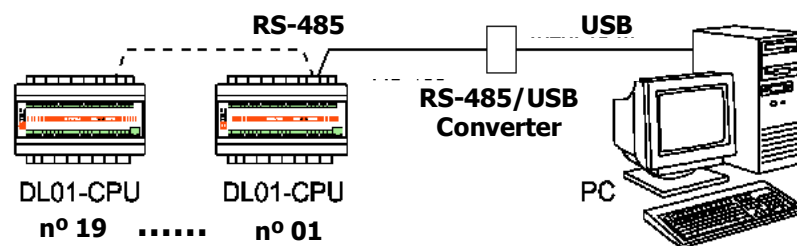


Figura III.9. Esquema simplificat del sistema d'adquisició de dades de la planta pilot.

- Sistemes auxiliars:

Es tracta de tots el sistemes que no es necessiten directament per l'experimentació a nivell de planta, però són essencials per assegurar una correcta operació de la mateixa. Aquests sistemes són bàsicament, el sistema elèctric, circuits de canonades d'HTF i de sals, vàlvules, tracejats elèctrics, etc. Finalment cal dir que per tal de minimitzar les pèrdues tèrmiques amb l'ambient i el terra dels diferents sistemes que integren la planta, aquests s'han aïllat degudament. Bàsicament s'han usat tres tipus d'aïllant: la llana de roca per les superfícies en contacte amb l'aire ambient i aïllant ceràmic (*Foamglass*) i formigó refractari per les superfícies en contacte amb el terra.

3.2 Estructura de tesi

La present tesi doctoral és una tesi basada en quatre articles científics, tres d'ells publicats en revistes SCI mentre que l'article restant està enviat a revista. Es tracta d'una tesi emmarcada dins la recerca experimental en el camp de l'emmagatzematge d'energia tèrmica per aplicacions solars d'alta temperatura. Tal i com es mostra a la Figura III.10, aquesta tesi s'ha dividit en dues parts tenint en compte l'aplicació a que fan referència els estudis realitzats en cada part. Una primera part referent a aplicacions de fred solar i una segona per aplicacions en centrals termosolars.

En la primera part, s'ha estudiat i verificat a escala de planta pilot dues tècniques usades per millorar els ratis de transferència de calor entre el fluid caloportador i el material d'emmagatzematge PCM en sistemes d'emmagatzematge d'energia tèrmica per calor latent (LTES). Aquesta part consta de dos articles. L'article 1 verifica i quantifica experimentalment, els avantatges de l'ús de múltiples PCMs disposats en cascada respecte l'ús d'un únic PCM. Per altra banda, l'article 2 quantifica la millora de la conductivitat efectiva del PCM mitjançant la incorporació de superfícies esteses, com ho és l'ús d'aletes en els tancs d'emmagatzematge.

La segona part d'aquesta tesi es centra en l'estudi del sistema d'emmagatzematge més usat actualment en plantes de concentració solar de cilindre parabòlic. El sistema de doble tanc operant amb sals foses. Específicament, aquesta part de la present tesi, consta de dos articles que fan referència a l'anàlisi del procés de bescanvi de calor en l'intercanviador HTF-sals del sistema de doble tanc. L'article 3 mostra per primer cop la viabilitat funcional d'un intercanviador de plaques per operar amb sals foses i HTF a les condicions d'operació d'una planta solar de cilindre parabòlic. A més, es mostra i es quantifica la influència en el procés de bescanvi de calor del gradient de temperatura i la configuració de la direcció del cabal d'HTF i sals. Com a continuació de l'article 3, l'article 4 mostra la comparació de dos HTFs usats en plantes comercials (Therminol VP-1 i Syltherm 800) des del punt de vista de les seves propietats termofísiques. I paral·lelament se n'avalua la seva influència

en el procés de bescanvi en l'intercanviador HTF-sals durant el procés de càrrega del sistema d'emmagatzematge de doble tanc.

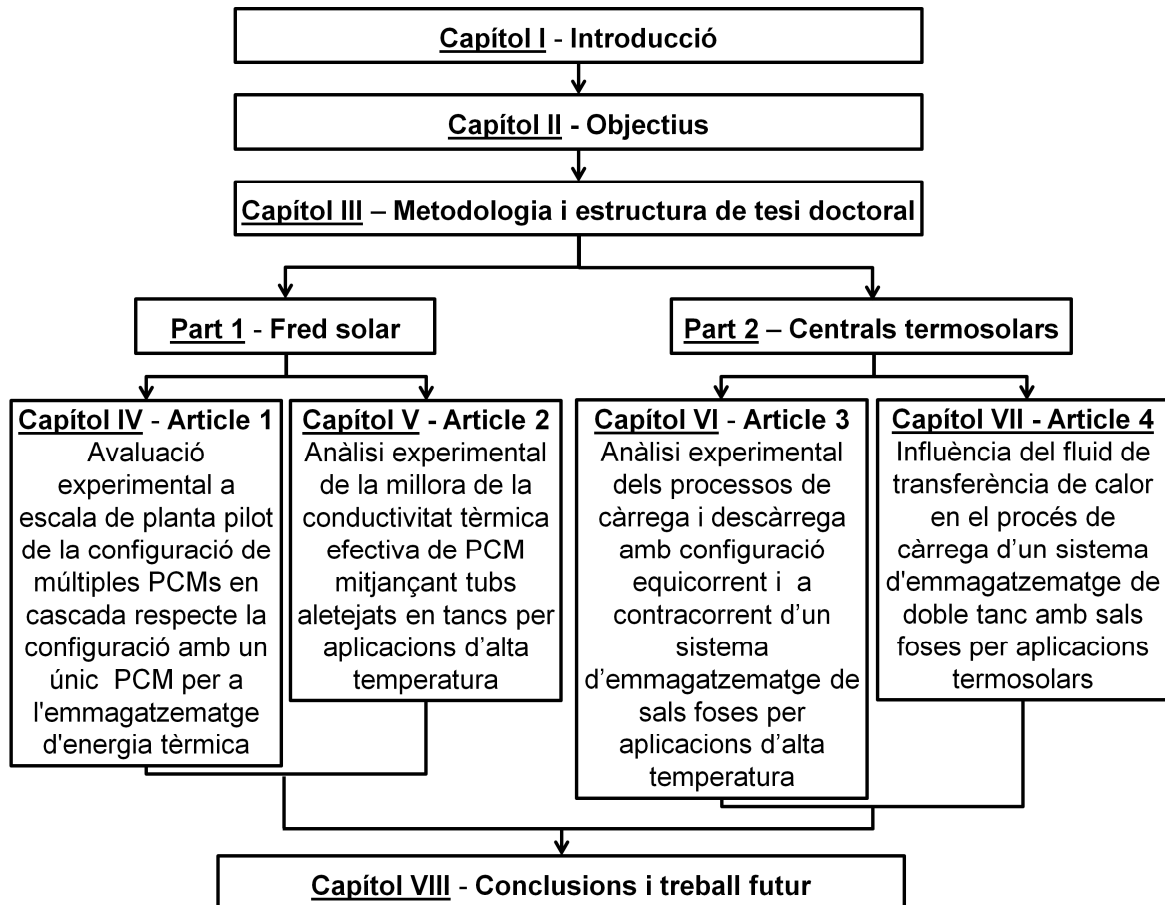


Figura III.10. Esquema de l'estructura de la present tesi doctoral.

3.3 Referències

1. Rathgeber C, Miro L, Cabeza LF, Hieber S. Measurement of enthalpy curves of phase change materials via DSC and T-History. When both methods needed to estimate the behaviour of the bulk materials in Applications. *Thermochim. Acta.* 2014;596:79–88.
2. U.E., "Horizon 2020. Work programme 2014-2015. General Annex. http://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014_2015/annexes/h2020-wp1415-annex-g-trl_en.pdf. [Accessed 19/06/2017].
3. Peiró G, Prieto C, Gasia J, Miró L, Cabeza LF. Two-tank molten salts thermal energy storage system for solar power plants at pilot plant scale: lessons

- learnt and recommendations for its design, star-up and operation. *Renew. Energy*. [In press].
4. Peiró G, Gasia J, Miró L, Prieto C, Cabeza LF. Importance of thermal energy storage pilot plant facilities for solar energy applications. ISES Eurosun 2016 - International conference on solar energy for buildings and industry, Palma, Mallorca (Spain).

4 Avaluació experimental a escala de planta pilot de la configuració de múltiples PCMs en cascada respecte la configuració amb un únic PCM per a l'emmagatzematge d'energia tèrmica

4.1 Introducció

La configuració de múltiples sistemes LTES, conegut a la literatura com a sistema cascada o sistema multi-fase, és una tècnica utilitzada amb l'objectiu de millorar la transferència de calor entre l'HTF i el PCM. El propòsit principal d'aquesta tècnica es mantenir aproximadament constant el gradient de temperatura entre l'HTF i el PCM durant els cicles de càrrega i descàrrega i en conseqüència incrementar el rendiment tèrmic del sistema [1]. Un sistema en cascada es defineix com la disposició en sèrie en la direcció del cabal d'HTF de dos o més sistemes LTES amb diferents PCMs. Essent la configuració òptima en un ordre decreixent respecte les temperatures de fusió i creixent respecte la capacitat d'emmagatzematge durant el procés de càrrega i a l'inrevés en la descàrrega.

L'ús d'aquesta tècnica respecte l'ús d'un sistema amb únic PCM, presenta els següents avantatges:

- La millora dels ratis de transferència de calor entre l'HTF i el PCM.
- Es manté una temperatura de sortida de l'HTF més uniforme durant més temps.
- Increment de l'exergía del sistema, fet que implica una major energia transferida o absorbida per part de l'HTF.
- Reducció dels temps de càrrega i descàrrega.

Els avantatges de l'ús d'aquesta tècnica han estat demostrats principalment mitjançant models numèrics. No obstant, els models numèrics presenten limitacions degut a les suposicions establertes i a les limitacions pròpies de les eines utilitzades pel càlcul del model. Per aquest motiu, es fan necessaris els estudis experimentals per tal d'obtenir una idea més aproximada del comportament real del sistema prèviament al seu desenvolupament comercial.

En la literatura disponible s'han trobat escassos estudis experimentals referents a la configuració en cascada. Els quals fan referència a aplicacions d'aigua calenta sanitària i centrals termosolars [2-4].

El present estudi amplia la literatura disponible en aquest camp i per primer cop mostra l'anàlisi experimental, a escala de planta pilot (>100 kg), d'un sistema LTES en cascada per aplicacions de fred solar.

4.2 Contribució a l'estat de l'art

El principal objectiu del present article va ser demostrar experimentalment els avantatges de l'ús de múltiples PCMs disposats en cascada respecte l'ús d'un únic PCM en sistemes LTES. Els PCMs utilitzats en l'experimentació van ser hidroquinona i d-mannitol. Els quals havien estat prèviament seleccionats com a candidats idonis per aplicacions de refrigeració solar degut a que el seu rang de temperatures de fusió es troba entre 150 °C i 200 °C i a la seva elevada entalpia de fusió [5].

L'experimentació que es mostra en el present article va ser realitzada mitjançant dos dels tres tancs d'emmagatzematge de carcassa i tubs que es disposen a la planta pilot de la Universitat de Lleida descrita en el Capítol III de la present tesi. Concretament, es van realitzar tres tipologies d'experiment corresponents a tres casos d'estudi diferents. La descripció dels tres casos d'estudi es mostra a continuació:

- Cas 1: Configuració amb un únic PCM amb hidroquinona (Figura IV.1).

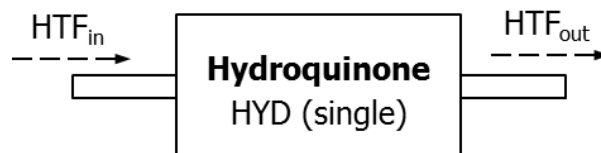


Figura IV.1. Configuració cas d'estudi 1.

- Cas 2: Configuració amb un únic PCM amb d-mannitol (Figura IV.2).

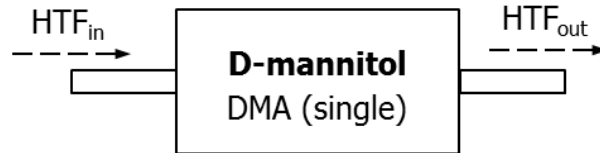


Figura IV.2. Configuració cas d'estudi 2.

- Cas 3: Configuració en cascada amb hidroquinona i d-mannitol (Figura IV.3).

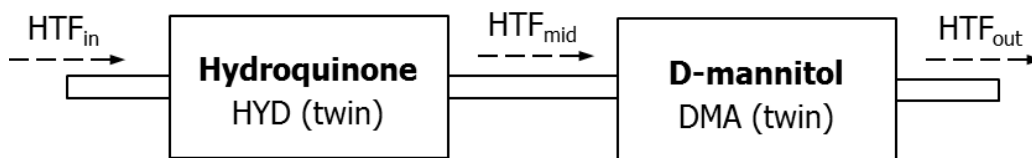


Figura IV.3. Configuració cas d'estudi 3.

Per cada cas d'estudi, l'experimentació va consistir en un procés de càrrega dels tancs on la temperatura inicial del PCM es va fixar a 145 °C i la temperatura d'entrada i cabal d'HTF a 187 °C i 2,8 m³/h, respectivament. Les condicions de temperatura mostrades són les corresponents a una aplicació real d'un sistema de refrigeració solar situat a la Universitat de Sevilla [6]. Pel cas d'estudi 3, tal i com s'observa en la (Figura IV.3), l'HTF circula primer pel tanc d'hidroquinona i després pel tanc de d-mannitol amb l'objectiu d'establir la configuració òptima per un sistema en cascada, la qual s'ha esmentat en la introducció d'aquest capítol.

Per tal de poder caracteritzar el comportament del sistema proposat en cada cas, es van analitzar els perfils de temperatura de l'HTF a l'entrada i sortida del sistema i els perfils de temperatura del PCM en diversos punts dels tancs. També van ser calculats i analitzats paràmetres com l'energia emmagatzemada per quilogram, el paràmetre *effectiveness* i la conductivitat efectiva dels PCMs durant el canvi de fase. Un cop caracteritzat el comportament tèrmic del sistema en cada cas d'estudi, es va procedir a la comparativa i anàlisi de resultats.

Els resultats obtinguts verifiquen i quantifiquen experimentalment els

avantatges de l'ús d'una configuració en cascada per sistemes LTES. Els resultats mostren una diferència de temperatura entre l'entrada i sortida de l'HTF més uniforme en el sistema en cascada i un increment del 19,36% en el paràmetre *effectiveness* en el tanc de d-mannitol durant el canvi de fase. Aquest increment en el paràmetre *effectiveness* en el tanc de d-mannitol es tradueix en que el rati de transferència de calor entre l'HTF i el PCM és més elevat en el tanc de d-mannitol connectat en cascada durant el canvi de fase.

4.3 Contribució del candidat

El candidat ha realitzat la construcció i muntatge de l'equipament experimental, així com la planificació i realització de tots els experiments duts a terme. El candidat també ha realitzat el processament i anàlisi de les dades obtingudes en les proves experimentals i ha participat en la confecció de l'estructura i redacció del present article. Principalment en els capítols referents a l'anàlisi de resultats i en les conclusions.

4.4 Article



Experimental evaluation at pilot plant scale of multiple PCMs (cascaded) vs. single PCM configuration for thermal energy storage



Gerard Peiró, Jaume Gasia, Laia Miró, Luisa F. Cabeza*

GREA Innovació Concurrent, Universitat de Lleida, Edifici CREA, Pere de Cabrera s/n, 25001, Lleida, Spain

ARTICLE INFO

Article history:
Received 25 November 2014
Received in revised form
15 May 2015
Accepted 17 May 2015
Available online

Keywords:
Thermal energy storage
Phase change material
Thermal performance enhancement
Multiple PCM
Cascaded

ABSTRACT

The present paper provides on one hand, a literature review of the different studies available in the scientific literature where the concept of multiple phase change materials (PCM) configuration, also named cascaded or multi-stage, has been presented and on the other hand, an experimental evaluation of the advantages of using the multiple PCM configuration instead of the single PCM configuration in thermal energy storage (TES) systems at pilot plant to fill the gap of experimental and high scales studies on this concept in the literature. Two PCM with melting temperatures in a temperature range of 150–200 °C were selected due to their high value of heat of fusion and compared: d-mannitol and hydroquinone. Three configurations were evaluated: (1) single PCM with hydroquinone, (2) single PCM with d-mannitol and (3) multiple PCM with hydroquinone and d-mannitol. A discussion regarding the results on the specific energy stored and effectiveness as well as the evolution of the PCM and heat transfer fluid (HTF) through the time and at different and representative locations of the facility is presented. Results showed that the multiple PCMs configuration introduced an effectiveness enhancement of 19.36% if compared with single PCM configuration as well as a higher uniformity on the HTF temperature difference between the inlet and outlet.

© 2015 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Peiró G, Gasia J, Miró L, Cabeza LF. Experimental evaluation at pilot plant scale of multiple PCMs (cascaded) vs. single PCM configuration for thermal energy storage. *Renew. Energy* 2015;83:729-736.

DOI: 10.1016/j.renene.2015.05.029

4.5 Referències

1. Ibrahim NI, Al-Sulaiman FA, Rahman S, Yilbas BS, Sahin AZ. Heat transfer enhancement of phase change materials for thermal energy storage Applications. A critical review. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 2017;74:26-50.
2. Wang J, Ouyang Y, Chen G. Experimental study on charging processes of a cylindrical heat storage employing multiple-phase-change materials. *Int. J. Energy. Res.* 2001;25:439-447.
3. Farid MM, Kim Y, Kansawa A. Thermal performance of a heat storage module using PCM's with different melting temperature: experimental. *J. Sol. Energy*

Eng. Trans. ASME 1990;112:125-127.

4. Michels H, Pitz-Paal R. Cascaded latent heat storage for parabolic trough solar power plants. Sol. Energy 2007;81:829-837.
5. Gil A, Oró E, G. Peiró G, Álvarez S, Cabeza LF. Material selection and testing for thermal energy storage in solar cooling. Renew. Energy 2013;57:366-371.
6. Gallego AJ, Ruiz-Pardo A, Cerezuela-Parish A, Sánchez J, Martín-Macareno C, Cabeza LF, Camacho EF, Oró E. Mathematical modelling of a PCM storage tank in a solar cooling plant. Sol. Energy 2013;93:1-10.

5 Anàlisi experimental de la millora de la conductivitat tèrmica efectiva de PCM mitjançant tubs aletejats en tancs per aplicacions d'alta temperatura

5.1 Introducció

L'ús de superfícies esteses és una tècnica usada en freqüència per tal d'augmentar els ratis de transferència de calor entre dos medis, sobretot quan en un dels dos medis la resistència tèrmica és elevada. Per aquest motiu, en sistemes LTES, l'ús de superfícies esteses o aletes es considera una bona opció per millorar els baixos ratis de potència transferida o absorbida que s'obtenen degut a les baixes conductivitats tèrmiques que presenten els PCMs [1].

Mitjançant l'ús d'aletes es proporciona un increment de l'àrea de transferència de calor entre l'HTF i el PCM amb un material que posseeix una conductivitat tèrmica més elevada. En conseqüència, s'aconsegueix un increment de la conductivitat efectiva del PCM ja que es té més quantitat de material en contacte amb la superfície de bescanvi alhora que es redueix la resistència tèrmica entre l'HTF i el PCM. Per altra banda, l'ús d'aletes presenta desavantatges que cal tenir en compte per fer viable el sistema d'emmagatzematge, com són l'increment del cost del sistema i la reducció del percentatge de volum ocupat pel PCM respecte el volum del tanc. Aquest paràmetre es coneix com a *packing factor*.

Tanmateix, la millora en la transferència de calor en sistemes LTES pel fet d'incorporar aletes depèn en gran mesura de factors com el material de les aletes, les pròpies dimensions i forma de l'aleta, gruix, separació entre aletes i el nombre d'aletes. És per aquest motiu que en els últims anys s'han realitzat diversos estudis, la majoria numèrics, centrats en la influència d'aquests factors sobre la transferència de calor entre l'HTF i el PCM i en el procés de canvi de fase en sistemes LTES per aplicacions d'alta temperatura [2-6].

Així doncs, existeixen pocs estudis experimentals a gran escala de l'ús d'aletes en sistemes LTES per aplicacions d'alta temperatura, com pot ser el fred solar. En aquest àmbit es destaca un estudi, previ al que es presenta en aquest

capítol, realitzat a la planta pilot de la Universitat de Lleida mitjançant dos tancs idèntics, un amb aletes i l'altre sense. Ambdós tancs operant amb hidroquinona com a PCM [7]. En aquest estudi es va analitzar la influència de l'ús d'aletes en la resposta del comportament tèrmic del PCM des del punt de vista del temps de fusió i solidificació i de la potència i energia absorbida/transferida. Els resultats van mostrar un reducció en el temps de fusió/solidificació del PCM al tanc amb aletes, fet que implica una millora en la conductivitat efectiva del PCM.

Per tal de quantificar la millora de la conductivitat efectiva mitjançant l'ús d'aletes i completar l'anterior estudi, es va realitzar el present article amb l'objectiu d'estudiar experimentalment la influencia de l'ús d'aletes en la conductivitat efectiva del PCM sota diferents rangs de potència tèrmica aplicats al sistema d'emmagatzematge.

5.2 Contribució a l'estat de l'art

L'experimentació mostrada en aquest article es va realitzar a la planta pilot de la Universitat de Lleida on es van utilitzar dos dels tres tancs d'emmagatzematge per calor latent, geomètricament idèntics, descrits en el Capítol III. Un dels dos tancs utilitzats, disposava de 196 aletes quadrades distribuïdes al llarg del feix de tubs amb una distància entre aletes de 10 mm (Figura V.1). El PCM escollit va ser hidroquinona degut a que el seu rang de temperatura de fusió el feia un bon candidat per operar en un sistema de fred solar (150 °C-200 °C).



(a)



(b)

Figura V.1. Tancs LTES (a) Sense aletes i (b) amb aletes.

Per cada tanc es van realitzar diferents experiments els quals van consistir en diversos processos de càrrega. Es va experimentar amb tres tipus de cabal d'HTF diferents per tal d'assegurar els règims laminar, transició i turbulent de l'HTF. Paral·lelament també es va experimentar amb dos gradients de temperatura entre la temperatura d'entrada de l'HTF i la temperatura inicial del PCM. En total es van realitzar sis experiments per tanc. A la Taula V.1 es poden veure les característiques dels experiments realitzats.

Taula V.1. Característiques dels experiments realitzats. Rangs de temperatura i cabals.

Tipus de tanc	Experiment	Gradient de temperatura [°C]	Cabal volumètric d'HTF [m ³ /h]
Sense aletes	1	145-187	1,4
	2		2,2
	3		3
	4	130-200	1,4
	5		2,2
	6		3
Amb aletes	1	145-187	1,4
	2		2,2
	3		3
	4	130-200	1,4
	5		2,2
	6		3

Per cada experiment es van analitzar els perfils de temperatura de l'HTF i del PCM, la fracció de fosa del PCM, així com la conductivitat tèrmica efectiva d'ambdós tancs. Per tal de calcular la conductivitat tèrmica efectiva del PCM es va definir un volum de control de PCM consistent en un tub de la part central del feix de tubs del tanc. Paral·lelament, es va definir la conductivitat tèrmica efectiva del PCM com una conductivitat tèrmica millorada calculada a través de la relació entre la transferència de calor total transferida al volum de control de PCM i la potència tèrmica transferida al mateix, tenint en compte només el mecanisme de transferència de calor per conducció.

Els principals resultats obtinguts es van observar en el temps de canvi de fase del PCM i en la conductivitat efectiva del mateix. A la Figura V.2 es pot veure la

fracció de fosa per cada tanc pels experiments realitzats amb els gradients de temperatura de 145 °C-187 °C (Figura V.2a) i de 130 °C-200 °C (Figura V.2b), respectivament. Els experiments amb les sigles WOF (*Without fins*) corresponent als realitzats amb el tanc sense aletes, mentre que els experiments amb les sigles WF (*With fins*) corresponen als realitzats amb el tanc amb aletes. Alhora els experiments s'han ordenat del 1 al 6, de menor a major potència subministrada al PCM.

En general, en ambdós tancs s'observa una disminució del temps de fusió i per tant una evolució més ràpida de la fracció de fosa amb a l'augment de la potència subministrada. Es tracta d'un comportament esperat ja que a major potència es subministra una major energia per unitat de temps al PCM. Per altra banda, es pot veure que el tanc que incorpora aletes presenta menors temps de fusió per una mateixa potència subministrada respecte el tanc sense aletes. Aquest efecte es veu minimitzat quan els ratis de potència són més elevats. Aquest fet es deu a que a menor potència subministrada al tanc, sobretot en règim laminar, el factor limitant es troba en la resistència tèrmica del PCM que es veu reduïda per la incorporació d'aletes. En canvi a major potència subministrada, sobretot en règim turbulent, l'efecte de les aletes es veu minimitzat per la millora en el coeficient de transferència de calor per convecció de l'HTF. La millora en els temps de fusió del PCM en el tanc amb aletes es un clar indicador de la millora en la conductivitat efectiva del PCM tal i com es pot observar a la Taula V.2. En aquest cas s'observa un increment en la conductivitat efectiva del PCM del tanc amb aletes entre el 4,11% i 25,83% dependent de si es tracta dels experiments a major i menor potència tèrmica subministrada al PCM.

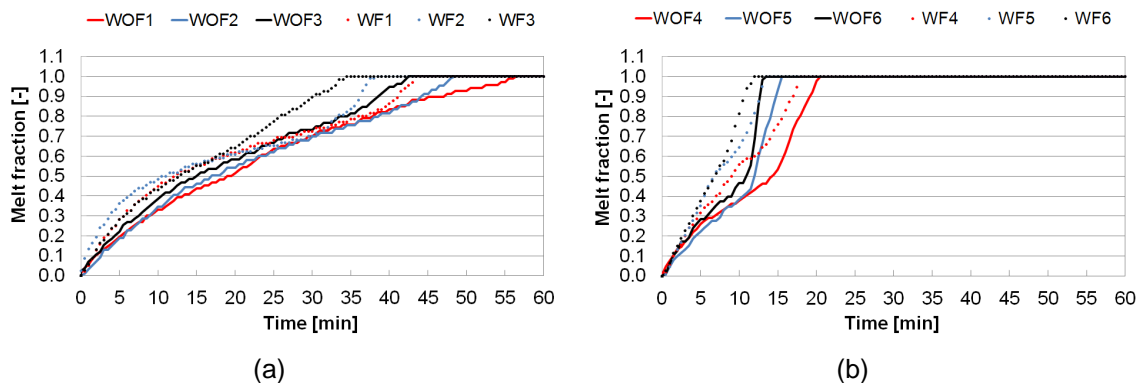


Figura V.2. (a) Fracció de fosa en ambdós tancs pels experiments amb un gradient de temperatura de 145 °C-187 °C i (b) fracció de fosa en ambdós tancs pels experiments amb un gradient de temperatura de 130 °C-200 °C.

Taula V.2. Conductivitat tèrmica efectiva del PCM per a cada experiment realitzat.

Experiment Amb aletes (WOF)/sense aletes (WF)	Conductivitat tèrmica efectiva [W/m-K]		
	Sense aletes (WOF)/	Amb aletes (WF)	Increment [%]
1	0.45	0.57	25.83
2	0.50	0.59	18.47
3	0.55	0.63	12.3
4	0.61	0.67	11.40
5	0.66	0.69	4.41
6	0.71	0.73	4.11

5.3 Contribució del candidat

El candidat ha participat en el muntatge del l'equip experimental a planta, en la seva posta en marxa i en la planificació i en l'execució dels experiments duts a terme. El candidat també ha realitzat tot processament i anàlisi de les dades i ha generat el suport gràfic de l'article. També ha participat en les tasques de redacció del mateix.

5.4 Article

Manuscript Details

Manuscript number	ATE_2017_6353
Title	Experimental analysis of the effective thermal conductivity enhancement of PCM using finned tubes in high temperature bulk tanks
Article type	Research Paper

Abstract

Solar cooling is a promising solution to overcome the high energy demand of buildings. Nevertheless, the time dependent nature of the solar source leads to the need of storage systems in order to better match the energy demand and supply. For this purpose, thermal energy storage was considered during last decades as the optimal solution at commercial scale. Latent heat materials may offer higher energy densities together with more constant outlet temperature than sensible heat storage materials, but their low thermal conductivities represent a drawback to overcome which several studies already faced. This paper presents an experimental study where the effective thermal conductivity of two identical storage tanks, one with 196 transversal squared fins and another one without fins, is determined and compared. In this case, hydroquinone was selected as PCM. A set of six experiments was performed in the 24 kWe oil test loop of the University of Lleida (Spain), combining three different flow rates and two heat transfer fluid temperature gradients between the storage tank inlet and outlet. Experimental results showed that the addition of fins can increase the effective thermal conductivity between 4% and 26%.

Keywords	thermal conductivity; phase change material; solar cooling; storage tank with fins; thermal energy storage
Taxonomy	Solar Cooling, Solar Heat Storage
Corresponding Author	Luisa F. Cabeza
Corresponding Author's Institution	University of Lleida

Gil A, Peiró G, Oró E, Cabeza LF. Experimental analysis of the effective thermal conductivity enhancement of PCM using finned tubes in high temperature bulk tanks. Submitted to *Renewable Energy* (2017).

5.5 Referències

1. Gasia J, Miró L, Cabeza LF. Materials and system requirements of high temperature thermal energy storage systems: A review Part 2: Thermal conductivity enhancement techniques. *Renew. Sust. Energ. Rev* 2016;60:1584-1601.
2. Guo C, Zhang W. Numerical simulation and parametric study on new type of high temperature latent heat thermal energy storage system. *Energy. Convers. Manag.* 2008;49:919–27.
3. Tao YB, He YL, Qu ZG. Numerical study on performance of molten salt phase

- change thermal energy storage System with enhanced tubes. Sol. Energy 2012;86:1155-63..
4. Jung EG, Boo JH. Thermal analytical model of latent thermal storage with heat pipe heat exchanger for concentrated solar power. Sol. Energy 2014;102:318–32.
 5. Tiari S, Qiu S, Mahdavi M. Numerical study of finned heat pipe-assisted thermal energy storage system with high temperature phase change material. Energy Convers. Manag. 2015;89:833-42.
 6. Zhao D, Tan G. Numerical analysis of a shell-and-tube latent heat storage unit with fins for air-conditioning application. Appl. Energy 2015;138:381–92.
 7. Gil A, Oró E, Miró L, Peiró G, Ruiz A, Salmerón JM, Cabeza LF. Experimental analysis of hydroquinone used as phase change material (PCM) to be applied in solar cooling refrigeration. Int. J. Refrig. 2014;39:95-103.

6 Anàlisi experimental dels processos de càrrega i descàrrega amb configuració equicorrent i a contracorrent d'un sistema d'emmagatzematge de sals foses per aplicacions d'alta temperatura

6.1 Introducció

La integració de sistemes TES en plantes termosolars permet ajustar la diferència entre l'energia demandada i la generada, incrementant així la flexibilitat i el factor de capacitat de la central termosolar [1]. L'ús de sistemes TES en centrals termosolars juga un paper fonamental en l'eficiència global de la central, així com en la reducció del costos finals de l'energia generada.

En l'actualitat, el sistema d'emmagatzematge més desenvolupat i provat en centrals termosolars comercials és el sistema de doble tanc operant amb sals foses com a material d'emmagatzematge [2]. El comportament tèrmic de la majoria de components, especialment el dels tancs d'emmagatzematge, ha estat extensament simulat i estudiat experimentalment, amb l'objectiu d'analitzar com la distribució de temperatures i com les pèrdues de calor afecten a la capacitat d'emmagatzematge del sistema [3-6]. Tot i així, existeixen aspectes com l'operació del bescanviador de calor HTF-sals que necessiten ser estudiats per tal de maximitzar l'energia absorbida/transferida pel sistema TES. El tipus d'intercanviador més econòmic que proporciona les característiques operacionals requerides per un sistema TES de doble tanc, és un intercanviador de carcassa i tubs [7]. I en conseqüència, és el tipus de bescanviador més usat en plantes comercials. Per altra banda, atenent a criteris de disseny com l'espai i l'eficiència energètica, els bescanviadors de plaques poden ser un bon candidat ja que són més flexibles als canvis, més compactes i eficients. Com a inconvenient, els bescanviadors de plaques, presenten una menor resistència mecànica i per tant es fa necessari l'estudi de la seva viabilitat per operar sota les condicions d'operació requerides per un sistema de doble tanc. Sobretot pel que fa al diferencial de pressió que es

produeix en el bescanviador en aquest tipus de plantes.

El present estudi va ser realitzat amb la col·laboració industrial d'*Abengoa Research* amb l'objectiu d'analitzar experimentalment, a escala de planta pilot, els cicles de càrrega i descàrrega d'un sistema TES de doble tanc i alhora provar la viabilitat funcional d'un intercanviador de plaques per operar amb oli tèrmic i sals foses sota les condicions reals d'una planta termosolar de cilindre parabòlic.

6.2 Contribució a l'estat de l'art

Aquest article representa el primer estudi experimental, a escala de planta pilot, on s'analitza el procés de bescanvi de calor d'un intercanviador de plaques operant en un sistema TES de doble tanc. Els materials usats van ser l'oli sintètic Therminol VP-1 com a HTF i una solució eutèctica formada per un 60 wt. % de NaNO_3 i 40 wt. % KNO_3 , altrament coneguda com a sal solar, com a material d'emmagatzematge.

L'experimentació mostrada en el present article es va dur a terme mitjançant la planta pilot d'emmagatzematge de la Universitat de Lleida. Tal i com s'ha descrit en el Capítol III, es tracta d'una planta de 0,33 MWh de capacitat d'emmagatzematge, basada en el disseny d'un sistema TES indirecte de doble tanc que opera amb un intercanviador plaques HTF-sal. La present planta permet simular els processos de càrrega i descàrrega d'un sistema de doble tanc comercial mitjançant quatre modes d'operació diferents. Segons si es tracta de càrrega, descàrrega o si la configuració del cabal és a contracorrent o a equicorrent. A la Figura VI.1 es poden veure els diagrames d'enginyeria corresponents als quatre modes d'operació esmentats anteriorment.

Tenint en compte els modes d'operació que permet la planta pilot, es van realitzar un total de sis experiments diferents consistents en diferents processos de càrrega i descàrrega variant la configuració del cabal (contracorrent o equicorrent) i variant el gradient de temperatura entre l'HTF i les sals. A la Taula VI.1 es pot veure un resum de les característiques operacionals dels experiments realitzats. El cabal d'HTF i el de les sals es va mantenir constant

en tots els processos corresponent a 0,09 kg/s i 0,11 kg/s, respectivament.

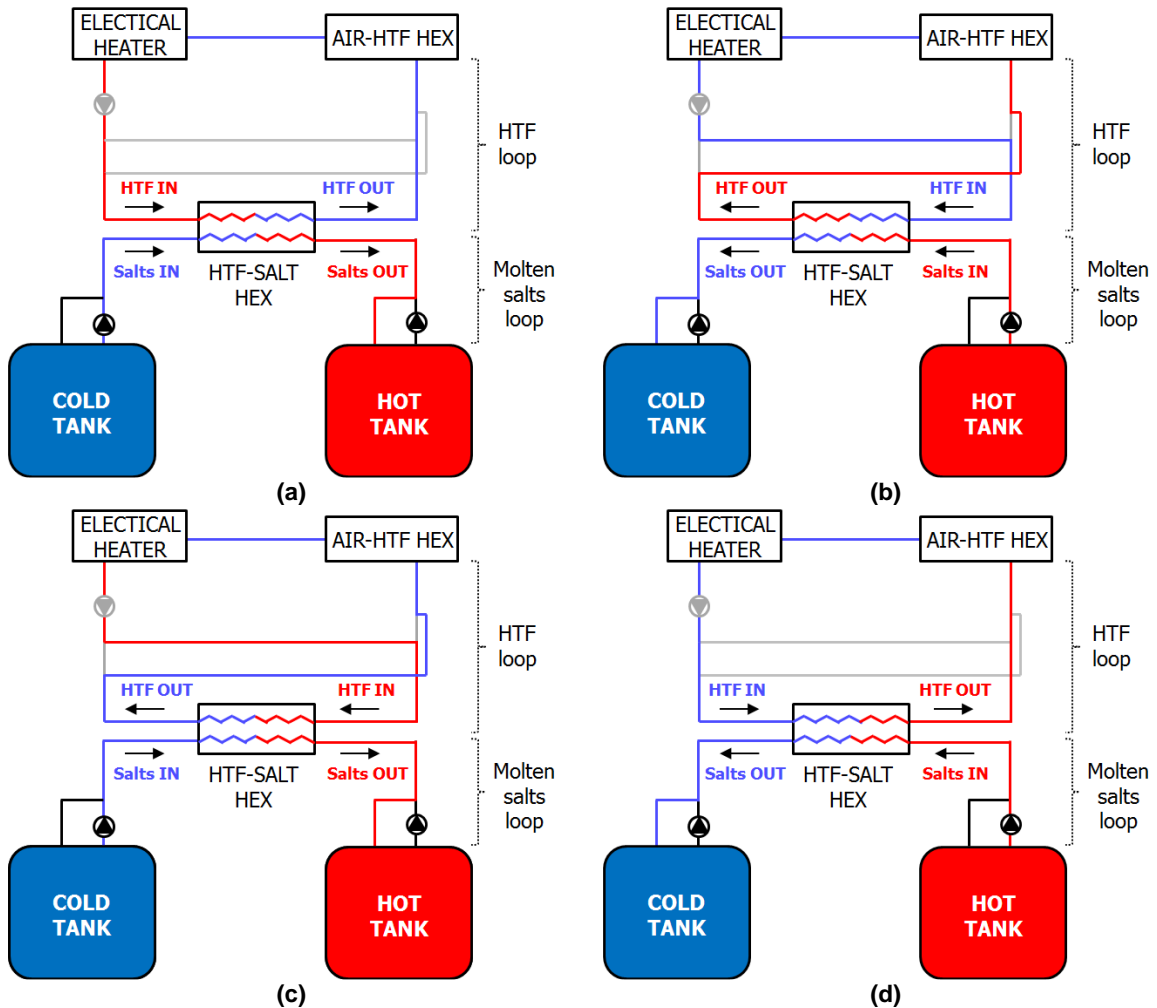


Figura VI.1. Modes d'operació del sistema de doble tanc de la planta pilot de la Universitat de Lleida: (a) Càrrega a equicorrent, (b) descàrrega a equicorrent, (c) càrrega a contracorrent i (d) descàrrega a contracorrent.

Durant tots els experiments realitzats es van enregistrar els perfils de temperatura a l'entrada i sortida del bescanviador de plaques i els cabals per ambdós fluids de treball. Mitjançant les dades obtingudes es va realitzar un anàlisi exhaustiu del comportament tèrmic del bescanviador a través de l'estudi de paràmetres com els perfils de temperatura, energia i potència absorbida/transferida per l'HTF i les sals, així com l'eficiència i l'efectivitat (*effectiveness*) del procés de transferència de calor en l'intercanviador.

Taula VI.1. Característiques operacionals dels diferents experiments realitzats.

Experiment	Procés	Configuració cabal	Temperatura d'entrada [°C]	ΔT [°C]
1	Càrrega	Equicorrent	HTF: 343 Sals: 297	46 ± 3
2	Descàrrega	Equicorrent	HTF: 298 Sals: 341	
3	Càrrega	Contracorrent	HTF: 341 Sals: 294	
4	Descàrrega	Contracorrent	HTF: 297 Sals: 346	
5	Càrrega	Contracorrent	HTF: 372 Sals: 303	68 ± 1
6	Descàrrega	Contracorrent	HTF: 308 Sals: 375	

Els resultats obtinguts demostren per primer cop la viabilitat operacional d'un bescanviador de plaques per operar amb sals solars i oli tèrmic en un sistema TES de doble tanc sota condicions d'operació reals. Paral·lelament, es va poder observar que per al mateix gradient de temperatura els experiments de càrrega i descàrrega amb la configuració de cabal a contracorrent presentaven un millor comportament. Obtenint increments de la potència absorbida/transferida de 65,5% a 78,8%. Per altra banda, amb la mateixa configuració de cabal, els experiments duts a terme amb més gradient tèrmic presentaven increments de la potència absorbida/transferida del 12,9% a 35,5%.


Finalment es demostra que una configuració de cabal a contracorrent amb el màxim gradient de temperatura possible, en aquest cas 68 °C, és la l'estratègia d'operació que proporciona els resultats més òptims.

6.3 Contribució del candidat


Quan el candidat va iniciar els estudis de doctorat, ja formava part de l'equip tècnic que dirigia la planta pilot d'alta temperatura de la Universitat de Lleida. Essent les seves tasques, l'execució dels experiments i el manteniment de la planta, així com el tractament de les dades obtingudes i la posterior redacció

d'informes i articles científics com el que es presenta en aquest capítol.

6.4 Article




Contents lists available at ScienceDirect



Applied Energy
journal homepage: www.elsevier.com/locate/apenergy

Experimental analysis of charging and discharging processes, with parallel and counter flow arrangements, in a molten salts high temperature pilot plant scale setup



Gerard Peiró^a, Jaume Gasia^a, Laia Miró^a, Cristina Prieto^b, Luisa F. Cabeza^{a,*}

^aCREA Innovació Concurrent, Universitat de Lleida, Edifici CREA, Pere de Cabrera s/n, 25001 Lleida, Spain
^bAbengoa Research, C/Energía Solar 1, 41012 Sevilla, Spain

HIGHLIGHTS

- Charging and discharging processes are evaluated in a two-tank CSP facility at pilot plant scale.
- Two flow arrangements, counter flow and parallel flow are analyzed and discussed.
- Two different temperature ranges are analyzed and discussed.
- 1000 kg of molten salts is used as thermal energy storage (TES) material.
- Therminol VP-1 is used as heat transfer fluid (HTF).

<p>ARTICLE INFO</p> <p>Article history: Received 17 March 2016 Received in revised form 28 May 2016 Accepted 11 June 2016 Available online 23 June 2016</p> <p>Keywords: Concentrated solar power Sensible heat storage Two-tank Molten salts Heat exchanger Parallel flow arrangement Counter flow arrangement</p>	<p>ABSTRACT</p> <p>Despite the fact that there are some commercial concentrated solar power plants worldwide, there is currently a lack of experimental reports about the operational characteristics of this type of plants. Therefore, a two-tank molten salts thermal energy storage (TES) pilot plant at the University of Lleida (Spain) was used to analyze charging and discharging processes under real conditions. In this facility, 1000 kg of molten salts are used as TES material and Therminol VP-1 is used as heat transfer fluid (HTF). This facility is equipped with measurement equipment which allows an exhaustive analysis of the processes. In this study, the fact of varying the flow arrangement in the heat exchanger (parallel and counter flow arrangements) and the temperature difference between the molten salts and the HTF have been studied and discussed in terms of temperature profiles, energy and power stored/released from/to both HTF and molten salts, efficiencies and effectiveness. The best working conditions found were counter flow arrangement with a temperature grading of about 65 °C.</p> <p>© 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.</p>
--	--

Peiró G, Gasia J, Miró L, Prieto C, Cabeza LF. Experimental analysis of charging and discharging processes, with parallel and counter flow arrangements, in a molten salts high temperature pilot plant scale setup. Appl. Energy 2016;178:394-403.

DOI:10.1016/j.apenergy.2016.06.032

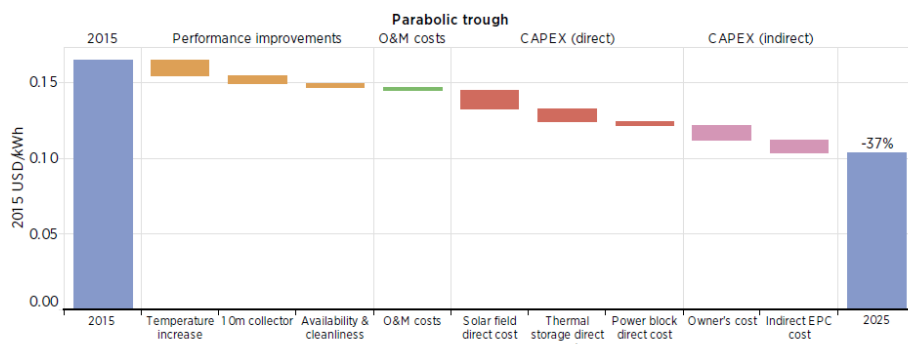
6.5 Referències

1. Sioshansi R, Denholm. The value of concentrating solar power and thermal energy storage. *IEEE Trans. Sustainable Energy* 2010;Vol. 1 no.3:173-183.
2. Liu M, Tay NHS, Bell S, Belusko M, Jacob R, Will G, Saman W, Bruno F. Review on concentrating solar power plants and new developments in high temperature thermal energy storage technologies. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 2016;53:1411-1432.
3. Suarez C, Iranzo A, Pino FJ, Guerra J. Transient analysis of the cooling process of molten salt thermal storage tanks due to stand by heat loss. *Appl. Energ.* 2015;142:56-65.
4. Zaversky F, García-Barberena J, Sánchez M, Astrain D. Transient molten salt two-tank thermal storage modelling for CSP performance simulations. *Sol. Energ.* 2013;93:294-311.
5. Prieto C, Miró L, Peiró G, Oró E, Gil A, Cabeza LF. Temperature distribution in molten salts tank for CSP plant. *Sol Energy* 2016;135:518-526.
6. Prieto C, Osuna R, Fernández AI, Cabeza LF. Molten salt facilities, lessons learnt at pilot plant scale to guarantee commercial plants; Heat losses evaluation and correction. *Renew. Energ.* 2016;94:175-185.
7. Herrmann U, Kelly B, Price H. Two-tank molten salt storage for parabolic trough solar power plants. *Energy* 2004;29:883–93

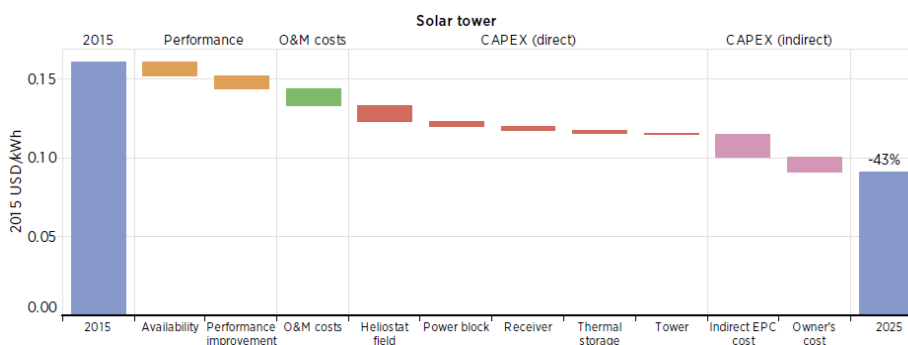
7 Influència del fluid de transferència de calor en el procés de càrrega d'un sistema d'emmagatzematge de doble tanc amb sals foses per aplicacions termosolars

7.1 Introducció

Una de les principals barreres que limita que la tecnologia termosolar estigui més estesa arreu del món, és l'elevat cost de l'energia elèctrica generada o "Levelised Cost of Electricity" (LCOE). Tot i així, la tecnologia termosolar es troba en una fase inicial del seu desenvolupament i es preveu que per l'any 2025 el paràmetre LCOE de les centrals termosolars es redueixi un 37% per plantes de cilindre parabòlic i un 43% per plantes de torre (Figura VII.1a i Figura VII.1b).



(a)



(b)

Figura VII.1. Potencial de reducció del LCOE en centrals termosolars 2015-2025. (a) Central de cilindre parabòlic de 160 MW i (b) central de torre solar de 150 MW [1].

En general, tal i com es pot observar en la Figura VII.1.a i Figura VII.1.b, la reducció del LCOE de les plantes CSP, passa per la millora de l'eficiència energètica i la reducció dels costos de la planta. I en especial, per les plantes de cilindre parabòlic, es destaquen el sistema TES i el camp solar com els aspectes amb més potencial per poder reduir el LCOE de la planta (Figura VII.1.a).

El sistema TES més utilitzat en les plantes comercials de cilindre parabòlic es basa en un sistema de doble tanc operant amb sals foses com material d'emmagatzematge [2]. La integració d'aquest tipus de sistemes, suposa un increment dels costos d'inversió de la planta, però també n'augmenta l'eficiència, flexibilitat i la capacitat. El que es tradueix en una reducció dels costos d'operació de la planta [3].

Pel que fa al camp solar, la reducció dels costos es preveuen pel desenvolupament de noves estratègies d'operació/integració d'aquest amb el sistema TES i el bloc de potència [4], per la millora tecnològica del sistema de captació solar i pel desenvolupament de nous fluids de transferència de calor HTF que permetin treballar a temperatures d'operació superior a les actuals (400°C per una planta de cilindre parabòlic). Una temperatura d'operació més elevada implica una millora en l'eficiència del cicle de potència [5]. En l'actualitat, amb els HTFs disponibles i més usats en centrals termosolars comercials (olis tèrmics, sals foses i aigua/vapor) s'assoleixen eficiències termodinàmiques en el cicle de potència entre un 35% i un 42%. Però per tal d'assolir eficiències del 50% es requereixen nous HTFs estables a 700 °C [6].

L'ús de nous HTFs, també contribueix a una millora en l'eficiència d'emmagatzematge del sistema TES. Aquest fet es tradueix en una reducció en el volum del sistema i per tant en una reducció dels costos d'inversió de la planta [5]. En aquest sentit, entendre com es desenvolupa el procés de transferència de calor entre l'HTF i el material d'emmagatzematge suposa un aspecte clau per tal de desenvolupar noves estratègies d'operació que millorin l'eficiència del sistema TES. Per tant, no només és necessària la recerca centrada en la millora de les propietats dels HTFs, sinó també la recerca

experimental del comportament tèrmic d'aquests amb la interacció amb el sistema TES.

Amb aquest objectiu es va realitzar el present article, on es va estudiar la influència de dos tipus diferents d'HTF usats en centrals termosolars comercials, (l'oli sintètic Therminol VP-1 i el fluid amb base de silicona Syltherm 800), en el procés de càrrega d'un sistema TES de doble tanc operant amb sals foses com a material d'emmagatzematge. A l'igual que en l'anterior article, aquest va ser realitzat amb la col·laboració industrial d'*Abengoa research*.

7.2 Contribució a l'estat de l'art

El present article consta de dues parts diferenciades un primera part teòrica i una segona part experimental.

Per una banda, en la primera part, es mostra un estudi comparatiu entre els HTFs Therminol VP-1 i Syltherm 800 a partir de les seves propietats termofísiques i la seva influència en diferents paràmetres operacionals d'una central termosolar, com poden ser la potència tèrmica transferida/absorbida o la potència de bombeig de l'HTF. A més a més, es proporcionen les equacions empíriques de les diferents propietats de cada fluid i la seva descripció gràfica a partir de les dades proporcionades pels fabricants.

Per altra banda, en la segona part d'aquest article, es mostra un estudi experimental on es compara el comportament tèrmic d'ambdós fluids estudiats operant en un intercanviador de plaques d'un sistema TES de doble tanc. El material d'emmagatzematge utilitzat en aquest cas va ser una solució eutèctica formada per un 60 wt. % de NaNO_3 i 40 wt. % KNO_3 altrament coneguda com sals solars o sals foses.

L'experimentació presentada en aquesta segona part de l'article, va consistir en diversos processos de càrrega, utilitzant ambdós HTFs, del sistema TES de doble tanc que es disposa a la planta pilot de la Universitat de Lleida, descrit en el Capítol III de la present tesi. Durant el procés les sals es van bombejar des del tanc fred del sistema TES fins al tanc calent, passant per l'intercanviador de plaques HTF-sals en una configuració a contracorrent. En cada experiment

realitzat la temperatura inicial de càrrega va ser 293 °C i 341 °C per les sals i l'HTF, respectivament. El cabal màssic d'HTF es va fixar a 0,08 kg/s i el de les sals 0,12 kg/s.

Par tal de comparar la influència dels dos HTFs estudiats es van analitzar els següents paràmetres: perfils de temperatura, coeficient global de transferència de calor, coeficients de transferència de calor per convecció dels diferents fluids de treball, l'efectivitat de bescanvi de calor (*effectiveness*) i l'eficiència tèrmica del procés de càrrega. A més a més, per tal de validar els resultats obtinguts es va realitzar un anàlisi d'incerteses en els resultats calculats i es van proposar dues metodologies de càlcul pel coeficient global de transferència de calor de l'intercanviador. Per una banda, mitjançant un balanç d'energia a l'intercanviador i per altra, mitjançant les correlacions dels coeficients de transferència de calor per convecció.

A la Taula VII.1 es pot veure una comparativa de les propietats d'ambdós fluids obtinguda a partir dels resultats de l'estudi teòric. De la mateixa taula, s'extreu que ambdós fluids són aptes per treballar en una central termosolar de cilindre parabòlic ja que són estables a 400 °C. Alhora, s'observa que el fluid Therminol VP-1 presenta millors característiques per operar a les temperatures requerides en les centrals termosolars de cilindre parabòlic. Presenta una viscositat i pressió de vapor més baixes i densitat, conductivitat i calor específic més alts que el Syltherm 800. Aquest fet es tradueix en un menor consum elèctric per la bomba d'HTF, majors ratis de transferència de calor i menors pèrdues tèrmiques en les instal·lacions en que s'usa el fluid Therminol VP-1. Paral·lelament el fluid Therminol VP-1 presenta una menor pressió de vapor que el Syltherm 800, el que comporta una menor pressió d'operació en la instal·lació i un menor risc de cavitació de la bomba d'HTF. No obstant, com a principals desavantatges, es destaquen l'ús de tracejats elèctrics per prevenir les solidificacions del Therminol VP-1 en ambients on la temperatura es troba per sota dels 12 °C (punt de cristallització del Therminol VP-1), augmentant així els costos d'operació de la central. I alhora també presenta majors ratis de toxicitat per l'usuari i el medi ambient respecte el Syltherm 800.

Taula VII.1. Taula comparativa de les propietats del Therminol VP-1 i Syltherm 800 i la seva influència en diversos paràmetres operacionals d'una central termosolar.

Propietats	Therminol VP-1		Syltherm 800	
Estabilitat	400 °C		400 °C	
Cristal·lització	12 °C		-40 °C	
Densitat	↑ P _{Bomba}	↑ Q _{Intercanviada}	↓ P _{Bomba}	↓ Q _{Intercanviada}
Viscositat cinemàtica	↓ P _{Bomba}	↑ Q _{Intercanviada}	↑ P _{Bomba}	↓ Q _{Intercanviada}
Calor específic	↑ Q _{Intercanviada}		↓ Q _{Intercanviada}	
Conductivitat tèrmica	↑ Q _{Intercanviada}		↓ Q _{Intercanviada}	
Pressió de vapor	↓ Pressió	↓ Cavitació	↑ Pressió	↑ Cavitació
Toxicitat	↑		↑	
Preu	3,07 €/kg		41,64 €/kg	

Els resultats obtinguts en la segona part de l'article, mostren com el procés de càrrega en que usa Therminol VP-1 presenta millor comportament validant i quantificant així, les diferents conclusions obtingudes en l'anàlisi teòric. Els resultats mostren, per una banda, que l'altura proporcionada per la bomba d'HTF és un 16,9 % més elevada en el procés de càrrega que usa Syltherm 800 i per altra banda, mostren una diferència en un 37,4 % superior en el rati de transferència de calor i un 48 % superior en el coeficient de transferència de calor en el procés que usa Therminol VP-1.

7.3 Contribució del candidat

El candidat ha realitzat la recerca d'informació i anàlisi de la mateixa referent a la primera part teòrica de l'estudi. Principalment ha col·laborat en la part experimental d'aquest estudi on ha dissenyat i executat tots els experiments. A més a més, ha realitzat el processament de les dades obtingudes i el seu anàlisi posterior, així com en la redacció i presentació final de l'article. Els

coautors han col·laborat principalment en la redacció de l'article, en la discussió de resultats i confecció de les conclusions.

7.4 Article



Influence of the heat transfer fluid in a CSP plant molten salts charging process



Gerard Peiró ^a, Jaume Gasia ^a, Laia Miró ^a, Cristina Prieto ^b, Luisa F. Cabeza ^{a, *}

^a GREA Innovació Concurrent, INSPIRES Research Centre, Universitat de Lleida, Pere de Cabreria s/n, 25001, Lleida, Spain

^b Abengoa Research, C/Energía Solar 1, 41012, Seville, Spain

ARTICLE INFO

Article history:
Received 23 December 2016
Received in revised form
24 April 2017
Accepted 26 May 2017
Available online 29 May 2017

Keywords:
Heat transfer fluid
Therminol VP-1
Syltherm 800
Molten salts
Concentrated solar power plant
Plate heat exchanger

ABSTRACT

The selection of a proper heat transfer fluid (HTF) is a key factor to increase the efficiency of concentrated solar power plants and therefore, to reduce their internal associated CAPEX (capital expenditures of developing and constructing a plant, excluding any grid-connection charges) and OPEX (operating expenditures from the first year of a project's operation). This paper presents a comparative study of two commercial HTF which are widely used in different industries and CSP plants: thermal oil Therminol VP-1 and silicone fluid Syltherm 800. First, the authors theoretically studied the properties of both HTF based on the data given by the manufactures. Afterwards, the authors experimentally perform the comparison in a two-tank molten salt thermal energy storage pilot plant built at the University of Lleida (Spain). The study is focused on the plate heat exchanger of the facility during several charging processes with a counter flow arrangement. Results from both studies showed that, for the same working conditions, Therminol VP-1 is the best candidate for the above-mentioned purposes due to its higher heat transfer, lower thermal losses and lower power consumption associated to the HTF pump. However, it presents problems a low crystallization point, which should also be considered.

© 2017 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Peiró G, Gasia J, Miró L, Prieto C, Cabeza LF. Influence of the heat transfer fluid in a CSP plant salts charging process. *Renew. Energy* 2017;113:148-158.

DOI:10.1016/j.renene.2017.05.083

7.5 Referències

1. Taylor M, Ralon P, Ilaas A. The Power to Change: Solar and Wind Cost Reduction Potential to 2025. IRENA 2016;[ISBN 978-92-95111-97-4].
2. (<http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/>). [Accessed: 20/04/2017]
3. Glatzmayer G. Summary report for concentrating solar power thermal storage workshop-New Concepts and Materials for Thermal Energy Storage and

- Heat-Transfer Fluids. National Renewable Energy laboratory 2011 [NREL/TP- 5500-52134].
4. Wittmann M, Eck M, Pitz-Paal R, Muller-Steinhagen H. Methodology for optimized operation strategies of solar thermal power plants with integrated heat storage. *Solar Energy* 2011;85:653-659.
 5. Kutscher C, Mehos M, Turchi C, Glatzmaier G, Moss T. Line-Focus Solar Power Plant Cost Reduction Plan. National Renewable Energy laboratory 2010 [NREL/TP-5500-48175].
 6. Vignarooban K, Xinhai X, Arvay A, Hsu K, Kannan AM. Heat transfer fluids for concentrating solar power systems. A review. *Appl. Energy* 2015;146:383–396.

8 Conclusions i treball futur

8.1 *Conclusions de la tesi*

Aquesta tesi ha contribuït en el camp de l'emmagatzematge d'energia tèrmica per aplicacions de fred solar i centrals termosolars. En aquesta tesi s'ha destacat el desenvolupament de l'energia solar a gran escala com un element essencial en un nou model de desenvolupament sostenible basat en l'ús de les energies renovables. També s'ha detallat un estat actual de la tecnologia solar i el seu mercat. A més a més, es mostra la importància i els beneficis dels sistemes TES per fer que l'energia solar sigui un recurs energètic, flexible, ajustable i consistent.

Es tracta d'una tesi completament experimental on la recerca presentada s'ha realitzat d'acord amb la metodologia de desenvolupament TRL que identifica el nivells de maduresa d'una tecnologia. Bàsicament es centra entre els nivell TRL4-Validació de la tecnologia TES a escala de laboratori i TRL5- Validació en entorn rellevant. Concretament, per la realització dels estudis que es mostren en aquesta tesi, s'ha utilitzat la planta pilot que es disposa a la Universitat de Lleida per testejar sistemes TES, la qual va ser construïda l'any 2008 amb la col·laboració industrial de l'empresa Abengoa.

A continuació es destaquen les contribucions generals d'aquesta tesi:

- Aquesta tesi, ha contribuït a demostrar la necessitat i la utilitat de l'experimentació mitjançant plantes pilot per tal de consolidar la tecnologia TES a nivell comercial.
- La majoria de literatura disponible en el camp dels sistemes TES per aplicacions de fred solar i centrals termosolars fa referència a estudis numèrics o estudis a petita escala. Aquesta tesi ha contribuït a ampliar la literatura disponible i a proporcionar estudis experimentals a escala de planta pilot (>100 kg) en aquest camp.
- Els estudis experimentals que s'inclouen en aquesta tesi proporcionen dades útils per validar simulacions i per evitar problemes tècnics en futurs dissenys experimentals i comercials de sistemes TES per aplicacions de fred solar i centrals termosolars. I per tant, a reduir-ne el

seus costos d'inversió i operació.

La present tesi consta de quatre articles i s'ha dividit en dos parts segons l'aplicació estudiada a que fan referència els diferents estudis.

La primera fa referència a sistemes LTES per aplicacions de fred solar. On s'ha estudiat experimentalment l'ús de múltiples PCMs connectats en cascada i la incorporació d'aletes en tancs LTES. Dues tècniques conegudes de millora de la transferència de calor entre el PCM i l'HTF en sistemes LTES. Aquesta part consta de dos estudis referents a cada tècnica estudiada.

En aquesta primera part de la tesi s'han obtingut les següents conclusions:

- S'ha pogut comprovar que existeixen pocs estudis referents a l'ús de múltiples PCMs i la majoria són numèrics o a petita escala. L'article 1 d'aquesta tesi representa l'estudi a més gran escala en aquest camp realitzat en el moment de la publicació del mateix.
- En l'article 1, s'han comparat les configuracions amb únic tanc operant amb Hidroquinona i d-mannitol amb el sistema en cascada operant amb ambdós materials. En el sistema en cascada s'ha observat una diferència de temperatura entre l'entrada i sortida de l'HTF més uniforme durant més temps. Fet que implica majors ratis de transferència de calor.
- També s'ha pogut observar un increment del 19;36% en el paràmetre *effectiveness* o efectivitat en la transferència de calor del PCM, en el tanc de d-mannitol del sistema en cascada durant el canvi de fase.
- També s'ha mostrat la importància que té en els sistemes en cascada la selecció de PCMs adequats i la seva disposició en el sistema. Per tant resulta essencial realitzar estudis acurats de les temperatures de fusió i entalpies dels PCMs abans de ser usats en un sistema en cascada.
- En l'article 2 d'aquesta primera part, s'ha comparat el comportament de dos tancs d'emmagatzematge per calor latent, un amb aletes i l'altre sense. S'han estudiat diferents processos de càrrega variant la potència subministrada als tancs i se n'ha quantificat la conductivitat efectiva del PCM durant el canvi de fase
- Dels resultats obtinguts, s'ha pogut observar una reducció dels temps de

fusió i una millora de la conductivitat efectiva del PCM entre el 4,11% i 25,83% en el tanc amb aletes respecte el tanc sense aletes, segons el nivell de potència tèrmica subministrada al tanc.

- També s'ha pogut observar que la millora que suposa la incorporació de les aletes es veu minimitzada a més rati de potència transferida al PCM.
- Finalment, en ambdós articles d'aquesta primera part, es demostra la utilitat del càlcul de la conductivitat efectiva com a paràmetre per avaluar la millora dels ratios de transferència de calor entre l'HTF i el PCM en sistemes LTES.

En la segona part d'aquesta tesi, s'ha analitzat el procés de bescanvi de calor en un intercanviador de plaques d'un sistema d'emmagatzematge de doble tanc indirecte operant amb sals foses per aplicacions en centrals termosolars. Les principals conclusions obtingudes en aquesta segona part es mostren a continuació:

- En l'article 3, s'ha realitzat l'anàlisi del bescanviador de calor d'un sistema TES de doble tanc durant diferents processos de càrrega i descàrrega amb estratègies d'operació diferents. Amb la configuració del cabal d'oli tèrmic (Therminol VP-1) i sals a contracorrent i equicorrent i variant el gradient tèrmic entre aquests dos fluids a l'intercanviador.
- Aquest article mostra per primer cop la viabilitat funcional d'un intercanviador de plaques per operar amb oli tèrmic i sals a les condicions d'operació d'una planta termosolar de cilindre parabòlic.
- Aquest estudi quantifica i destaca la importància que tenen les estratègies d'operació del sistemes TES de doble tanc en paràmetres com la potència intercanviada, l'eficiència i en l'efectivitat de l'intercanviador.
- En l'article 3 es demostra que una configuració a contracorrent amb el màxim gradient de temperatura entre l'oli tèrmic i les sals es la configuració que proporciona millors resultats.

- En l'article 4, s'ha realitzat una comparativa des del punt de vista teòric i experimental entre dos HTFs existents a nivell comercial: l'oli tèrmic Therminol VP-1 i fluid amb base de silicona Syltherm 800. Per una banda, s'han comparat les propietats d'ambdós fluids i el seu impacte en aspectes operacionals d'una central termosolar i per altra banda s'ha comparat el seu comportament en un procés de càrrega d'un sistema TES de doble tanc operant amb sals foses.
- Aquest article demostra que la selecció d'un HTF adequat permet incrementar al eficiència del sistema de bescanvi i en conseqüència reduir els costos d'inversió i operació del sistema TES.
- De la comparativa teòrica, s'ha pogut observar que el l'oli tèrmic Therminol VP-1 presenta millors propietats per operar en una central termosolar però presenta una major toxicitat i majors costos operacionals degut a l'ús de tracejats per evitar solidificacions en ambients on la temperatura es troba per sota els 12°C
- De la comparativa experimental s'observa que el fluid Therminol VP-1 valida l'anàlisi teòric presentant un millor comportament. Mostrant una diferència en els ratis de transferència de calor i en el coeficient global de transferència de calor del bescanviador de 37,4% i 48%, respectivament.

8.2 Recomanacions i treball futur

A partir de la recerca realitzada en aquesta tesi i dels resultats obtinguts, han sorgit nous aspectes que no han estat estudiats en la present tesi i que poden tenir rellevant importància en el desenvolupament de la tecnologia TES aplicacions de fred solar i centrals termosolars. Aquest aspectes s'identifiquen a continuació com a recomanacions per al treball futur:

- Per aplicacions de fred solar:

En la present tesi s'han estudiat a escala de planta pilot dues tècniques de millora de la transferència de calor entre l'HTF i el PCM en sistemes LTES.

Però no s'ha tingut en compte aspectes com la qualitat de l'energia transferida o emmagatzemada i els costos d'aquests sistemes. Per aquest motiu en aquesta part es recomanen dos estudis complementaris:

1. Realitzar l'estudi de l'exergía del sistema LTES aletejat, del sistema de múltiples PCMs i comparar-la amb l'exergía del sistema LTES amb un únic PCM.
2. Realitzar l'estudi econòmic del sistema aletejat i del sistema de múltiples PCMs i comparar-lo amb sistema amb un únic PCM amb hidroquinona i d-mannitol. Extrapol·lar aquest anàlisi de costos de prototips a la producció industrial.

- Per aplicacions en centrals termosolars :

Aquesta part de la tesi s'ha centrat en un component essencial del sistema TES de doble tanc indirecte com és el bescanviador de calor. I la influència que poden tenir en el rendiment final del procés de bescanvi les diferents estratègies d'operació i els fluids de transferència de calor. Actualment encara existeixen aspectes d'operació, instrumentació dels sistemes TES de doble tanc que necessiten ser estudiats. En aquesta part es realitzen les següents recomanacions com a treball futur a realitzar en la planta pilot de la Universitat de Lleida:

1. Estudiar el rendiment global del sistema de doble tanc de la planta pilot tenint en compte els autoconsums de la planta.
2. Analitzar l'efecte del vent en les pèrdues tèrmiques i en la capacitat final d'emmagatzematge dels tancs de sals.
3. Caracteritzar el comportament de diferents tipologies de resistències per a sals foses.

Paral·lelament, es fa necessari el desenvolupament de nous HTFs amb propietats termofísiques millorades, nous materials d'emmagatzematge amb més capacitat tèrmica i que permetin emmagatzemar energia a més alta temperatura, per tal de reduir els costos del sistema TES. A més a més, el

desenvolupament de materials de baix cost pels tancs d'emmagatzematge o l'emmagatzematge directe també poden contribuir a la reducció dels costos del sistema TES.

Per altra banda, considerant l'emmagatzematge termoquímic com alternativa al sistema TES de doble tanc, es té que l'energia emmagatzemada per unitat de volum és major. Però es tracta d'una tecnologia en fase desenvolupament i aspectes com el disseny dels reactors per a reaccions químiques específiques, l'estabilitat química dels materials o la durabilitat a llarg termini dels sistemes, necessiten ser desenvolupats.

Tots aquests aspectes amplien i obren noves línies de recerca pel que fa al desenvolupament de noves tecnologies pel sistema TES de doble i tanc i pel que fa l'emmagatzematge termoquímic per aplicacions en centrals termosolars. Les quals necessitaran ser provades a escala de planta pilot.

9 Altres activitats de recerca

En aquesta secció d'aquesta tesi es mostren altres activitats realitzades en l'àmbit de la recerca per part del candidat, com poden ser altres publicacions científiques, participació en congressos, participació en projectes i altres activitats realitzades.

9.1 *Participació en altres articles publicats en revistes SCI*

1. **Peiró G**, Prieto C, Gasia J, Miró L, Cabeza LF. Two-tank molten salts thermal energy storage system for solar power plants at pilot plant scale: lessons learnt and recommendations for its design, star-up and operation. Submitted to Renew. Energy. [In press]
2. Prieto C, Miró L, **Peiró G**, Oró E, Gil A. Cabeza LF. Temperature distribution in molten salts tank for CSP plant. Sol. Energy 2016;135:518-526.
3. Gasia J, Gutierrez A, **Peiro G**, Miro L, Grageda M, Ushak S, Cabeza LF. Thermal performance evaluation of bischofite at pilot plant scale. Applied Energy 2015;155:826-833.
4. Gil A, Oró E, Miró L, **Peiró G**, Ruiz A, Salmerón JM, Cabeza LF. Experimental analysis of hydroquinone used as phase change material (PCM) to be applied in solar cooling refrigeration. Int. J. Refrig. 2014;39:95-103.
5. Gil A, Oró E, **Peiró G**, Álvarez S, Cabeza LF. Material selection and testing for thermal energy storage in solar cooling. Renew. Energy 2013;57:366-371.

9.2 *Participació en congressos*

1. **Peiró G**, Gasia J, Miró L, Prieto C, Cabeza LF. Experimental comparison between two diferent HTF operating in a Two-tank molten salts plate heat exchanger charging process. CNIT 2017 - 10 Congreso Internacional de Ingeniería Temodinámica, Lleida (Spain).
2. Gasia J, de Gracia A, Barreneche C, Cabeza LF, Arena S, Solé A, **Peiró G**, Martin M. Partial loads as thermal energy storage enhancement strategy.

- CNIT 2017 - 10 Congreso Internacional de Ingeniería Temodinámica, Lleida (Spain).
3. Gasia J, Miró L, **Peiró G**, Prieto C, Cabeza LF. Use of pilot plant scale facilities as key factor for an optimal design and operation of commercial CSP plants with TES systems. IRES 2017 - 11th International Renewable Energy Storage Conference, Düsseldorf (Germany).
 4. Gasia J, Romani J, **Peiró G**, Miró L, Prieto C, Cabeza LF. Operational characteristics of molten salts for CSP plants. Annex 30 ECES IA - IEA Third Meeting 2016, Tokyo (Japan).
 5. Gasia J, Romani J, **Peiró G**, Miró L, Prieto C, Cabeza LF. High temperature TES pilot plant: Experimental research and lessons learnt. Annex 30 ECES IA - IEA Third Meeting 2016, Tokyo (Japan).
 6. **Peiró G**, Gasia J, Miró L, Prieto C, Cabeza LF. Importance of thermal energy storage pilot plant facilities for solar energy applications. ISES Eurosun 2016 - International conference on solar energy for buildings and industry, Palma, Mallorca (Spain).
 7. Cabeza LF, Prieto C, Miró L, Gasia J, **Peiró G**. Design and start-up of two pilot plants for molten salts storage testing. Power and energy 2016 - ASME 2016 10th International Conference on Energy Sustainability, Charlotte (North Carolina, USA).
 8. Gasia J, Gutierrez A, Miró L, **Peiró G**, Ushak S, Cabeza LF. Analysis of bischofite as phase change material (PCM) at pilot plant scale. Greenstock 2015 - The 13th International Conference on Energy Storage, Beijing (China).
 9. Gasia J, **Peiró G**, Miró L, Cabeza LF. Multiple PCMs configuration: An experimental study at pilot plant scale. Greenstock 2015 - The 13th International Conference on Energy Storage, Beijing (China).
 10. Gasia J, Gutierrez A, Miró L, **Peiró G**, Ushak S, Cabeza LF. Bischofite as phase change material (PCM) for thermal energy storage (TES) applications. ISES Eurosun 2014 - International conference on solar energy for buildings and industry, Aix-les-Bains (France).

11. Oró E, Gil A, Miró L, **Peiró G**, Álvarez S, Cabeza LF. Thermal energy storage implementation using phase change materials for solar cooling and refrigeration applications. SHC 2012 - International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry, San Francisco (USA).
12. Gil A, Oró E, Miró L, **Peiró G**, Ruiz A, Salmerón JM, Cabeza LF. Experimental analysis of hydroquinone used as phase change material (PCM) to be applied in solar cooling refrigeration. ISES Eurosun 2012 - International conference on solar energy for buildings and industry, Rijeka and Opatija (Croatia).

9.3 Participació en projectes

1. Consorcio solar de I+D, ConSOLI-DA, CENIT 2008-1005.
2. Contribución del almacenamiento de energía térmica a la eficiencia energética en edificios y en aplicaciones Industriales, ENE2008-06687-C02-01, 2009-2011.
3. El almacenamiento de energía térmica como herramienta de mejora de la eficiencia energética en la industria (TES in industry), ENE2011-22722, 2012-2014.
4. Experimentació en planta pilot sobre emmagatzematge d'energia tèrmica per centrals termosolars. Contracte de recerca amb Abengoa Solar New Technologies, 2012.
5. Instal·lació i testeig d'un acumulador de calor amb PCM per acumulació de calor provinent de forns industrials. Contracte de recerca amb Tecnalia Research & Innovation, 2012.
6. Use of innovative thermal energy storage for marked energy savings and significant lowering of CO2 emissions (INNOSTORAGE), PIRSES-GA-2013-610692, 2013-2017.
7. PhD on Innovation Pathways for TES (INPATH-TES), European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 657466, 2015-2018.

8. Identificación de barreras y oportunidades sostenibles en los materiales y aplicaciones del almacenamiento de energía térmica, ENE2015-64117-C5-1-R, Ministerio de Ciencia e Innovación, 2016-2018.

9.4 Altres

1. Realització de la documentació tècnica per desenvolupar sessions de formació sobre auditories energètiques de diversos components d'instal·lacions residencials e industrials. ICAEN-Institut Català de l'Energia-ICAEN; Universitat Politècnica de Catalunya (UPC); Universitat de Lleida (UdL).
2. INNOSTOCK 2012, The 12th International Conference on Energy Storage, 2012, Lleida (Spain). Membre del comitè organitzador.
3. EUROTHERM Seminar N°99 - Advances in thermal Energy Storage, 2014, Lleida (Spain). Membre del comitè organitzador.