TECNOLOGÍA DE ALMACENAMIENTO DE CSP

ÚLTIMOS DESARROLLOS

Programa de Energías Renovables y Eficiencia Energética en Chile

giz Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

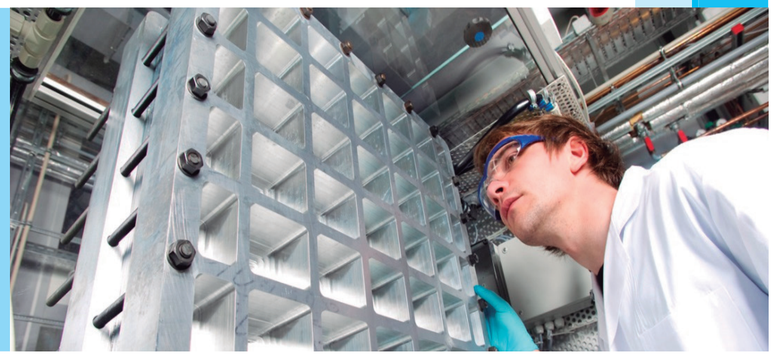
Por encargo de:
Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza, Obras Públicas y Seguridad Nuclear
de la República Federal de Alemania

Ministerio de Energía
Gobierno de Chile

SISTEMAS DE TORRE SOLAR - ESTADO Y PERSPECTIVA

Tecnología de Almacenamiento de CSP

ÚLTIMOS DESARROLLOS



Programa de Energías Renovables y Eficiencia Energética en Chile

giz Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Por encargo de:
Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza, Obras Públicas y Seguridad Nuclear
de la República Federal de Alemania

Ministerio de Energía
Gobierno de Chile

Tecnología de Almacenamiento de CSP

ÚLTIMOS DESARROLLOS

Edición:
Deutsche Gesellschaft für
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Friedrich-Ebert-Allee 40
53113 Bonn • Alemania

Dag-Hammarskjöld-Weg 1-5
65760 Eschborn • Alemania

Nombre del proyecto:
Programa Energías Renovables y
Eficiencia Energética en Chile

Marchant Pereira 150
7500654 Providencia
Santiago • Chile
T +56 22 30 68 600
I www.giz.de

Responsable:
Rainer Schröer/ Marlen Görner
E rainer.schroeer@giz.de

Título:
CSP Storage Technology – State of the art
Foto portada: Fraunhofer ISE, Germany

Autores:
Dominik Schlipf
Robin Stepper
Dr. Günter Schneider (enolcon gmbh)

enolcon gmbh
Pleidelsheimer Str. 47A
74321 Bietigheim-Bissingen
Germany
info@enolcon.com

enolcon

Aclaración:
El contenido de este informe está basado en un estudio elaborado por la GIZ Brasil, adoptado al contexto chileno.
Esta publicación ha sido preparada por encargo del proyecto "Fomento de la Energía Solar" implementado por el Ministerio de Energía y Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH en el marco de la cooperación intergubernamental entre Chile y Alemania. El proyecto se financia a través de la Iniciativa Alemana de Tecnología para la mejora del Clima (DKTI) del Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza, Obras Publicas y Seguridad Nuclear (BMUB). Sin perjuicio de ello, las conclusiones y opiniones de los autores no necesariamente reflejan la posición del Gobierno de Chile o de GIZ. Además, cualquier referencia a una empresa, producto, marca, fabricante u otro similar en ningún caso constituye una recomendación por parte del Gobierno de Chile o de GIZ.

Santiago de Chile, diciembre de 2014

Tecnología de Almacenamiento de CSP

ÚLTIMOS DESARROLLOS

Programa de Energías Renovables y Eficiencia Energética en Chile

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Por encargo de:

Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza, Obras Públicas y Seguridad Nuclear de la República Federal de Alemania

Ministerio de Energía
Gobierno de Chile

Índice

1. INTRODUCCIÓN 9

2. ÚLTIMOS DESARROLLOS 11

2.1. Especificaciones técnicas 11
2.1.1. Principales parámetros técnicos 11
2.1.2. Integración en centrales de CSP 14
2.2. Desarrollo histórico de los sistemas de almacenamiento térmico 15
2.3. Descripción de la tecnología 17
2.3.1. Sistema de almacenamiento con sales fundidas 17
2.3.2. Sistema de tanques Ruth 20
2.3.3 Sistema de almacenamiento de cerámica tipo panal de abeja 22
2.3.1. Comparación 24

3. DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES 25

3.1. Costos de inversión (Inversiones de capital) 25
3.1.1. Costos totales de instalación 26
3.1.2. Detalle de costos de un sistema indirecto con sales fundidas 26
3.2. Costos operativos (Costos de OyM) 28
3.3. Contenido local estimado 29

4. PARTICIPANTES DEL MERCADO A NIVEL MUNDIA L 31

4.1. Material de almacenamiento 31
4.1.1. SQM 32
4.1.2. BASF 32
4.1.3. China FOMA Group 33
4.1.4. Saint-Gobain NorPro 33
4.2. Intercambiadores de calor 34
4.2.1. Alfa Laval 34

4.2.2. Babcock Power 35
4.2.3. SPX 35
4.2.4. GEA Heat Exchangers 36
4.2.5. Bertrams Heatec 36
4.3.1. ACS Cobra (Grupo Cobra) 37
4.3.2. Abengoa (Abengoa Solar) 38
4.3.3. Sener Ingenería y sistemas S.A 38
4.3.4. Bertrams Heatec (The Linde Group) 39
4.3.5. KAM 39

5. DESARROLLO TECNOLÓGICO 40

5.1. Avances en el desarrollo técnico de las tecnologías comerciales 40
5.1.1. Almacenamiento con sales fundidas 40
5.1.2. Sistema de tanques Ruth 41
5.2. Nuevos materiales de almacenamiento 42
5.3. Influencia en el sistema de CSP 44

6. RESUMEN Y CONCLUSIÓN CON RESPECTO A CHILE 45

7. REFERENCIAS 47

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Lista de abreviaturas

ARS	Pesos argentinos
BRL	Real (moneda de curso legal en Brasil)
CLP	Pesos chilenos
CSP	Energía solar concentrada (Concentrated Solar Power)
DNI	Radiación normal directa (Direct Normal irradiation)
EPC	Ingeniería, constrataciones y construcción
EUR	Euro
ETC	Empleo de tiempo completo
PIB	Producto interno bruto
HTF	Fluido de transferencia de calor
LCOE	Costos nivelados de la electricidad
OYM	Operación y mantenimiento
PPA	Contrato de compraventa de energía
PURPA	Public utility regulatory policy act (Ley de Regulación de los Servicios Públicos de Estados Unidos)
PV	Fotovoltaica
RD	Real Decreto
RESIA	Reliable electricity service investments act (Ley de inversiones para un servicio eléctrico confiable)
OTR	Oxidador térmico regenerativo
SCE	Elemento del colector solar
SEGS	Estación generadora de energía solar
EE.UU.	Estados Unidos de América
USD	Dólar estadounidense

Tablas

Tabla 1: Rangos de temperatura de los principales materiales utilizados en la industria de CSP 12
Tabla 2: Comparación del método directo e indirecto 18
Tabla 3: Antecedentes de centrales de CSP con sistemas de almacenamiento con sal fundida (extracto) 20
Tabla 4: Antecedentes de almacenamiento de vapor en centrales de CSP (extracto) 22
Tabla 5: Antecedentes de almacenamiento en sistemas de cerámica de tipo panal de abeja en centrales de CSP 23
Tabla 6: Comparación de las diferentes tecnologías de almacenamiento 24
Tabla 7: Costos totales de instalación 26
Tabla 8: Resumen de las compañías fabricantes del material de almacenamiento presentes en el mercado 31
Tabla 9: Información clave sobre SQM (con base en los informes anuales de la compañía 2008-2012) 32
Tabla 10: Información clave sobre BASF (con base en los informes anuales de la compañía 2008-2012) 32
Tabla 11: Información clave sobre China FOMA Group (con base en una entrevista realizada a representantes de la compañía) 33
Tabla 12: Información clave sobre Saint-Gobain (con base en los informes anuales de la compañía 2008-2012) 33
Tabla 13: Resumen de las compañías presentes en el mercado de intercambiadores de calor 34
Tabla 14: Información clave sobre Alfa Laval (con base en los informes anuales de la compañía 2008-2012, tipo de cambio: 1 EUR/0,11 SEK) 34
Tabla 15: Información clave sobre SPX (con base en los estados contables de la compañía 2009-2012) 35
Tabla 16: Información clave sobre GEA Group (con base en los informes anuales de la compañía 2009-2012) 36
Tabla 17: Resumen sobre compañías de EPC presentes en el mercado 37
Tabla 18: Información clave sobre el Grupo Cobra (con base en los informes anuales de la compañía 2008-2012) 37
Tabla 19: Información clave sobre Abengoa (con base en los informes anuales de la compañía 2008-2012) 38
Tabla 20: Información clave sobre Sener (con base en los informes anuales de la compañía 2008-2012) 38
Tabla 21: Información clave sobre Linde Group (con base en los informes anuales de la compañía 2008-2012 y una entrevista con representantes de la compañía) 39
Tabla 22: Información clave sobre KAM (con base en una entrevista realizada a representantes de la compañía y a los informes anuales 2010-2012; tipo de cambio para Alpiq Holding 1EUR/0,833 CHF) 39
Tabla 23: Parámetros del material de almacenamiento seleccionado 43
Tabla 24: Influencia de las innovaciones en el sistema de almacenamiento 44

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Figuras

Figura 1: Tecnologías de CSP consideradas (de izquierda a derecha): Colector Cilíndrico Parabólico (CCP), Torre Solar (TS) y Colector Lineal de Fresnel (LF) 9

Figura 2: LCOE para un ejemplo de central de CSP en Chile, en función del tamaño de almacenamiento 10

Figura 3: Descripción de las diferentes tecnologías de CSP y su correspondiente rango de temperatura 11

Figura 4: Transferencia de calor a un medio sensible (a) y a un medio latente (b) 12

Figura 5: Relaciones principales entre el Múltiplo Solar (MS), las horas a plena carga y el tamaño del sistema de almacenamiento 13

Figura 6: Configuración esquemática de la integración de un sistema de almacenamiento en una central de CSP 15

Figura 7: Resumen de los principales conceptos de almacenamiento y su desarrollo (línea punteada: desarrollo esperado) 16

Figura 8: Integración de un sistema de almacenamiento directo con sales fundidas y dos tanques en una central con torre de energía solar (aquí: central Gemasolar) (Adaptado del folleto Torresol energy de Gemasolar) 17

Figura 9: Esquema de un sistema de almacenamiento de energía térmica con sales fundidas y dos tanques, vistas lateral y superior, central Andasol 1 (120216) 18

Figura 10: Diagrama del tanque de sal fundida y sus cimientos 19

Figura 11: Esquema de acumulador con presión deslizante (Steinmann y Eck, 2006) 20

Figura 12: Capacidad de almacenamiento volumétrico para un sistema de tanques Ruth 21

Figura 13: Esquema de central termosolar con generación directa de vapor con acumulador de vapor integrado (Steinmann y Eck, 2006) 21

Figura 14: Diseño de almacenamiento modular (KAM) 22

Figura 15: Esquema de sistema de almacenamiento integrado en una central con receptor de aire ambiente, según (Krüger, Hahn y Zunft, 2011) 23

Figura 16: Detalle de costos de un sistema indirecto con sales fundidas de 2200MWh$_{th}$ 26

Figura 17: Detalle de costos de la sal solar 27

Figura 18: Detalle de costos de mantenimiento y reparación de una central de ESC 28

Figura 19: Esquema de la cadena de valor del sistema de almacenamiento térmico con sales fundidas 29

Figura 20: Contenido local asumido para sistemas de almacenamiento térmico con sales fundidas en Chile 30

Figura 21: Esquema de sistema de almacenamiento con un sólo tanque con barrera de aislación flotante (Querol, Olano y Lata, 2012) 41

Figura 22: Combinación de acumulador de vapor con un colector adicional de sobrecalentamiento (Steinmann y Eck, 2006) 41

Figura 23: Descripción de un concepto de almacenamiento térmico de tres etapas que combina almacenamiento con calor sensible y latente (Laing, Bahl y T., 2012) 42

Figura 24: Esquema de flujo a través de un sistema de flujo horizontal, según (Schneider y Maier, 2013) 43

Figura 25: Sistema Cellflux (Odenthal, Steinmann y Eck, 2014) 44

1. Introducción

Desde hace varios años se construyen centrales termosolares en todo el mundo, principalmente en el sur de Europa, norte y sur del África y Estados Unidos. También se realizaron numerosos proyectos en India, Medio Oriente y Australia. En la actualidad, Chile y China también han comenzado a desarrollar y construir centrales termosolares.

Los componentes principales de estas centrales son independientes de la tecnología utilizada: un sistema de heliostatos es utilizado para concentrar la radiación directa procedente del sol en un receptor. El interior del receptor contiene un fluido de transferencia de calor que se calienta y transfiere a un bloque de potencia donde el calor se utiliza para generar vapor que a su vez es utilizado en una turbina de generación de electricidad. Utilizando el sol como fuente de energía renovable, las centrales de Energía Solar Concentrada (CSP, por sus siglas en inglés) generan electricidad confiable y ecológica.

La posibilidad de implementar un sistema de almacenamiento de calor es una de las principales ventajas de las plantas de CSP. Basado en la configuración de la central, el sistema de almacenamiento puede integrarse en cada una de las tecnologías de CSP de gran escala disponibles en el mercado. (Figura 1)

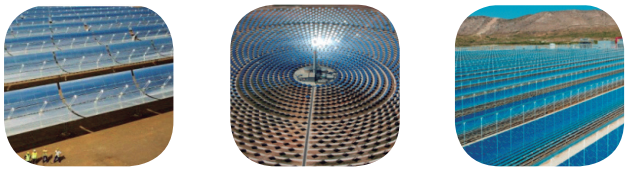


FIGURA 1: TECNOLOGÍAS DE CSP CONSIDERADAS (DE IZQUIERDA A DERECHA): COLECTOR CILÍNDRICO PARABÓLICO (CCP), TORRE SOLAR (TS) Y COLECTOR LINEAL DE FRESNEL (LF)

Los sistemas de almacenamiento de energía desempeñan un rol fundamental en todos los sistemas eléctricos. Dado que la energía eléctrica debe consumirse al momento de ser generada, todos los sistemas energéticos requieren unidades de generación confiables y flexibles. Éstas son controladas por un operador y se denominan unidades generadoras de energía "despachable". La red eléctrica cuenta además con sistemas de almacenamiento de energía de apoyo que permiten variaciones energéticas a lo largo del tiempo. Dada la creciente penetración de las unidades de generación de energía no despachable (tales como parques eólicos o centrales hidroeléctricas sin embalse), los sistemas de almacenamiento han cobrado importancia.

En general, el Costo Nivelado de la Energía (LCOE[1]) de una central de CSP depende fuertemente del factor de carga de la central. El LCOE se calcula tomando los costos totales de la central (costo de inversión, de capital, operación y de mantenimiento) y la producción eléctrica esperada a lo largo de un periodo de tiempo fijo (entre 20 y 25 años). Los sistemas de almacenamiento térmico aumentan por un lado el factor de carga pero al mismo tiempo incrementan los costos de instalación de la central. Cada central tiene un tamaño de almacenamiento óptimo (expresado aquí como horas a plena carga) que depende de condiciones ambientales y económicas, la ubicación y el diseño de la central. Los sistemas de almacenamiento aumentan la competitividad de las tecnologías de CSP en términos de LCOE, lo cual constituye un factor muy importante en Chile, donde las energías renovables carecen de apoyo por parte del gobierno y donde todas las tecnologías deben competir bajo las mismas regulaciones. Como ejemplo, teniendo en cuenta los elevados valores de DNI en Chile y suponiendo ciertas condiciones, el tamaño de almacenamiento óptimo en términos de LCOE rondaría las 10,5h, tal como se muestra en la Figura 2. El cálculo se basa en la estación de medición terrestre "Crucero II" situada en el norte de Chile (comuna de María Elena, Antofagasta). El LCOE se calcula utilizando un detallado

1 Evaluación económica del costo del sistema generador de energía incluyendo todos los costos a lo largo de su vida útil: inversión inicial, operación y mantenimiento, costo del combustible, costo de capital. Es muy útil para calcular los costos de generación a partir de diversas fuentes. Sus siglas son LCOE por su traducción al inglés: Levelized Cost of Energy

modelo financiero que toma costos de inversión actuales y datos comunes sobre financiamiento y desarrollo de proyectos. La producción de energía se calcula tomando en cuenta una central de energía con un sistema de colectores cilíndrico parabólicos de última generación con capacidad eléctrica de 100MW y un sistema de almacenamiento térmico en sales fundidas.

Existen diversos sistemas para realizar almacenamiento de energía, tales como mecánicos, (termo)químicos, eléctricos o térmicos. El Anexo A presenta una breve descripción de estos sistemas y su aplicación típica. Las centrales hidroeléctricas con grandes embalses de agua para almacenar energía durante días o incluso meses son un ejemplo bien conocido. Las baterías o los acumuladores son otro método común para almacenar energía eléctrica a pequeña escala.

El sistema de almacenamiento térmico opera según un principio de almacenamiento distinto a los métodos descritos anteriormente. El calor es generado y almacenado usando un material de almacenamiento antes de que la energía sea producida. Dado que la energía térmica producida por una central puede almacenarse fácilmente en diversos materiales, estos sistemas de almacenamiento ofrecen un método de fácil implementación y alta eficiencia, en especial para centrales térmicas como las centrales convencionales a carbón o las centrales de CSP. Con este método, las centrales de CSP actúan como una caldera común a vapor con una fuente de combustible variable pero previsible: el sol.

El tamaño del sistema de almacenamiento térmico es un parámetro clave en la fase de desarrollo del sistema de CSP, descrito en detalle en el capítulo 2.1.1. Con los últimos avances, se utilizan sistemas de almacenamiento de corto plazo con capacidad de 1 hora (de funcionamiento a plena carga) para garantizar la producción de energía en un día nublado. Se utilizan sistemas de almacenamiento de mediano plazo de alrededor de 5 horas para cubrir periodos de máxima demanda durante la tarde. En cuanto a los sistemas de almacenamiento de largo plazo, existen en el mercado sistemas con capacidades de almacenamiento que oscilan entre 8 y 16 horas, permitiendo el funcionamiento de la central de CSP con carga básica durante toda la noche. El tamaño del parque solar siempre está relacionado con el tamaño del sistema de almacenamiento; debe ser lo suficientemente extenso para cargar la totalidad del sistema de almacenamiento de calor y a la vez producir energía eléctrica.

Casi la mitad de las centrales de CSP que actualmente estan en funcionamiento en el mundo y casi todas las centrales de CSP en construcción están equipadas con un sistema de almacenamiento térmico. Estas cifras demuestran que los sistemas de almacenamiento térmico son parte fundamental de la tecnología de CSP. Comparadas con otras unidades de generación eléctrica que utilizan fuentes renovables de energía, la capacidad de integrar un sistema de almacenamiento es una gran ventaja para las centrales de CSP. Los sistemas de almacenamiento térmico cumplen un papel fundamental para lograr un mayor desarrollo y asegurar el éxito de la tecnología, ya que permiten suministrar energía en los momentos de demanda.

El presente informe presenta una descripción de los sistemas de almacenamiento térmico de última generación. Para cada una de las tecnologías se brinda una breve descripción del principio de funcionamiento y los principales parámetros técnicos. Dentro de las tecnologías actuales el informe incluye el sistema con sales fundidas, el acumulador de vapor (también denominado tanque Ruth) y el sistema de almacenamiento térmico de cerámica tipo panal de abeja.

El informe presenta los principales actores industriales relacionados con todo el sistema y los componentes clave e incluye una breve descripción de los avances técnicos. En este capítulo se analiza el estado de desarrollo de las tecnologías actuales y los nuevos materiales de almacenamiento para los próximos 3 a 5 años.

El objetivo principal del informe es posibilitar una comprensión básica sobre las diferentes tecnologías y entregar un panorama acerca del potencial de los sistemas de almacenamiento térmico, no solo para centrales de CSP sino para todo el sector energético.

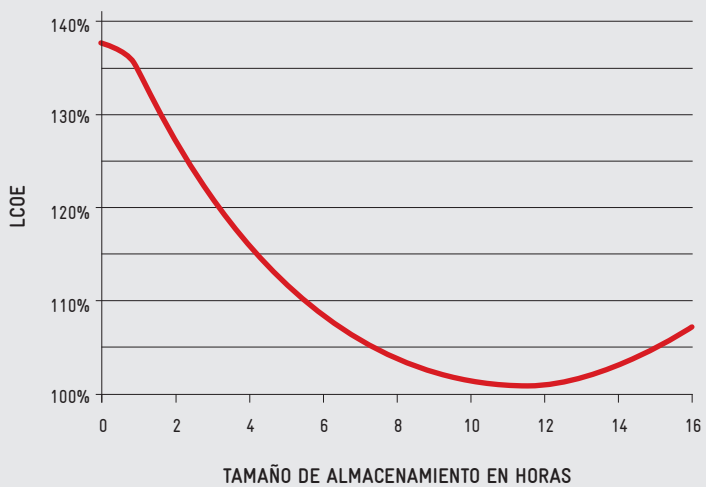


FIGURA 2: LCOE PARA UN EJEMPLO DE CENTRAL DE CSP EN CHILE, EN FUNCIÓN DEL TAMAÑO DE ALMACENAMIENTO

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

2. Últimos desarrollos

Este capítulo presenta los últimos desarrollos disponibles en el mercado en tecnologías de almacenamiento térmico para centrales CSP. Los sistemas de almacenamiento térmico funcionan en el rango de los 200°C a 800°C y dado que los diversos sistemas de CSP funcionan a distintas temperaturas (Figura 3), se requieren distintos sistemas de almacenamiento térmico para los diferentes niveles de temperatura.

FIGURA 3: DESCRIPCIÓN DE LAS DIFERENTES TECNOLOGÍAS DE CSP Y SU CORRESPONDIENTE RANGO DE TEMPERATURA

Considerando la estabilidad térmica del medio utilizado, los sistemas que utilizan aceite térmico como medio de transmisión de calor en el campo solar están limitados a temperaturas levemente superiores a los 400°C. Las centrales de CSP que utilizan sales fundidas como medio de transmisión de calor en el campo solar están limitadas a temperaturas de hasta unos 570°C aproximadamente. El aire como medio de transmisión de calor permite temperaturas mucho mayores, aunque las limitaciones en estos casos están dadas por la estabilidad térmica del equipo (válvulas, canales, etc.), en especial cuando se trata de periodos prolongados de funcionamiento a altas temperaturas.

2.1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

El objetivo principal de la fase de diseño de los sistemas de almacenamiento de calor es lograr que los sistemas sean eficientes en términos de costos y mejorar su eficiencia térmica y confiabilidad. Por lo tanto, es necesario considerar diversos parámetros técnicos que serán descritos en el siguiente capítulo.

2.1.1. Principales parámetros técnicos

Para describir los sistemas de almacenamiento de calor y a su vez determinar su rendimiento, es necesario definir características y parámetros técnicos. Con estos parámetros, es posible establecer una comparación entre diversos sistemas de almacenamiento térmico considerando sus ventajas y desventajas.

Para poder comparar los sistemas, también es necesario definir las características y parámetros técnicos según criterios comunes de modo que resulten válidos para todos los tipos de sistemas. En el siguiente capítulo se definen y describen estos parámetros y se presentan rangos y valores típicos de las diversas tecnologías de punta.

Sistemas de almacenamiento de calor latente y sensible

La distinción entre sistemas de almacenamiento de calor sensible y latente reside en si el medio de almacenamiento cambia o no entre estado sólido, líquido o gaseoso durante el ciclo de almacenamiento. Si el estado del medio de almacenamiento no cambia durante el ciclo de carga y descarga, solo se transmite calor sensible, por ende, el sistema pertenece a la categoría de sistema de almacenamiento de calor sensible. Si el medio de almacenamiento cambia su estado durante el ciclo de carga-descarga, se transfiere calor sensible y latente, por lo que

se trata entonces de un sistema de almacenamiento de calor latente. Calor latente se refiere al calor liberado o almacenado durante el cambio de fase, siendo el agua un ejemplo muy común de medio de calor latente.

La principal diferencia entre los dos sistemas es el cambio de temperatura durante la carga y descarga. La carga en el almacenamiento de calor sensible siempre produce un aumento en la temperatura del medio de almacenamiento, tal como lo muestra la Figura 4a. La descarga en el almacenamiento de calor sensible siempre produce una disminución en la temperatura del medio de almacenamiento.

En el almacenamiento de calor latente, el calor transferido se utiliza para realizar un cambio de fase en el mismo medio de almacenamiento. Durante el cambio de fase, la temperatura del medio de almacenamiento no cambia si se utilizan materiales puros. Cuando se trata de mezclas de diversos materiales, pueden ocurrir leves cambios de temperatura durante el cambio de fase. Para cargar un sistema de almacenamiento de calor latente se necesita una fuente de calor de alta temperatura. Debido a que la temperatura del medio principal siempre debe ser superior a la temperatura del medio de almacenamiento, el gradiente térmico debe ser muy elevado al comienzo del cambio de fase. El perfil típico de la temperatura resultante está descrito en la Figura 4b. Antes y después del cambio de fase se transfiere calor sensible. Al comenzar el cambio de fase la energía térmica transferida se utiliza para realizar el cambio de fase. La temperatura del material de cambio de fase se mantiene estable.

Temperatura de almacenamiento

El rango de temperatura de funcionamiento es un parámetro clave para el sistema de almacenamiento térmico y depende del propio material de almacenamiento o bien de los límites térmicos del fluido de transferencia de calor. El límite superior de temperatura del material suele definirse por la estabilidad térmica del material de almacenamiento (sal solar y aceite térmico) o de los recipientes de almacenamiento (cerámica y agua/vapor).

A mayor rango de temperatura útil, mayor es la capacidad de almacenamiento y la eficiencia del bloque de potencia. Según (Hermann & Kearney, 2000) los rangos de temperatura de los principales materiales utilizados en la industria de CSP se muestran resumidos en la Tabla 1.

TABLA 1: RANGOS DE TEMPERATURA DE LOS PRINCIPALES MATERIALES UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA DE CSP

MEDIO	LÍMITE DE TEMPERATURA INFERIOR (°C)	LÍMITE DE TEMPERATURA SUPERIOR (°C)	DENSIDAD MEDIA (KG/M³)
Aceite mineral	200	300	770
Aceite térmico sintético	180	410	900
Sales de nitratos	265	565	1870
Cerámica	--	900	2000

Eficiencia del sistema de almacenamiento

Se utilizan valores de eficiencia para describir el desempeño del sistema energético. En general la relación entre la producción útil de un sistema y la energía de entrada al sistema es definido como el valor de eficiencia. La bibliografía técnica disponible brinda diversos valores de eficiencia para las centrales de CSP, toma diversos límites para el sistema y, por lo tanto, considera diferentes definiciones de energía de entrada y producción de energía.

Para dar un panorama general de los sistemas de almacenamiento independientemente de los sistemas auxiliares, en este informe, la eficiencia de almacenamiento está definida como la relación entre la producción de energía térmica y la energía térmica de entrada del sistema de almacenamiento. Por lo tanto, sólo se consideran las pérdidas térmicas en la transferencia de calor y a través de la superficie de los recipientes de almacenamiento.

Otro factor crítico en el diseño de los sistemas de almacenamiento es la energía necesaria para operar el mismo sistema, denominada autoconsumo del sistema. El autoconsumo eléctrico depende principalmente de las bombas o ventiladores necesarios para transportar el HTF/fluido de almacenamiento y de los sistemas de calentamiento auxiliares. Debido a que la eficiencia de almacenamiento total depende de la relación de flujos de energía, no es fácil incluir el autoconsumo eléctrico. Por lo tanto, los rangos típicos de este valor se informan por separado.

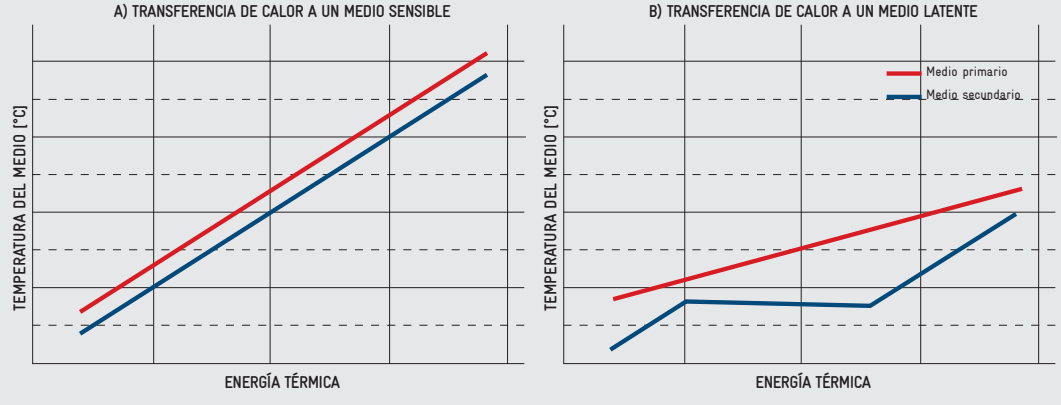


FIGURA 4: TRANSFERENCIA DE CALOR A UN MEDIO SENSIBLE (A) Y A UN MEDIO LATENTE (B)

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Capacidad calorífica y capacidad de almacenamiento volumétrico

La capacidad calorífica o térmica es la cantidad de energía térmica requerida para modificar la temperatura de un medio de transferencia de calor. En general, la capacidad calorífica está dada como una capacidad calorífica específica.

Para analizar y evaluar diferentes materiales de almacenamiento no basta con enfocarse únicamente en la capacidad calorífica. El rango de temperatura correspondiente también es un factor muy importante ya que describe el rango de funcionamiento útil del medio de transferencia de calor. Para calcular la capacidad de almacenamiento del sistema, la capacidad calorífica específica del material de almacenamiento debe multiplicarse por el posible gradiente térmico durante el funcionamiento. El resultado de esto, es la capacidad específica de almacenamiento por unidad de masa expresada en kWh/kg. Al multiplicar este resultado por la densidad del material, se obtiene la capacidad de almacenamiento volumétrico específica. Cuando se utiliza un material de almacenamiento sólido, es necesario que cuente con una sección transversal libre para permitir que el HTF fluya por el material de almacenamiento. Para calcular la capacidad de almacenamiento volumétrico, siempre se debe tomar en cuenta esta sección transversal libre, por ejemplo, utilizando la densidad aparente.

En resumen, la capacidad de almacenamiento volumétrico indica la capacidad que tiene un determinado volumen de un medio para almacenar cierta cantidad de energía térmica mientras se realiza un cambio de temperatura.

Recipientes de almacenamiento

Los recipientes de almacenamiento constituyen el elemento de contención del material de almacenamiento. Los requisitos para los recipientes de almacenamiento varían según el diseño del sistema de almacenamiento.

En el caso de los sistemas presurizados, las paredes de almacenamiento deben ser gruesas y se requiere de equipos especiales para su fabricación. Los sistemas que utilicen un material de almacenamiento líquido no permiten aislación térmica entre el material de almacenamiento y el recipiente. En este caso, el recipiente debe poder soportar la carga del material a temperatura y presión de funcionamiento. Por esta razón, en general se requiere de acero de alta calidad, que es más costoso.

Sin embargo, los requisitos de los sistemas de almacenamiento térmico para centrales de CSP no difieren de los de otras aplicaciones industriales con presencia de altas temperaturas y presiones, por lo que es posible construir estos componentes sin mayores problemas directamente en el país.

Tamaño del sistema de almacenamiento

El tamaño del sistema de almacenamiento es uno de los principales parámetros en la etapa de desarrollo de la central de CSP. La capacidad de almacenamiento térmico tiene incidencia en parámetros importantes del aspecto económico de la central, tales como el factor de utilización de la capacidad (cantidad de horas de funcionamiento de la central a plena carga) y los ingresos anuales. El tamaño de almacenamiento suele expresarse como unidad en horas, a pesar que el tamaño del sistema de almacenamiento se define como energía térmica almacenada. Al utilizar una unidad de horas es posible realizar una comparación directa entre distintos sistemas. Por lo tanto, el tamaño del sistema de almacenamiento define la cantidad de horas que el sistema de CSP es capaz de funcionar a plena carga sin calor adicional procedente del campo solar. Tomando como ejemplo una típica central con colectores cilíndrico parabólicos con un bloque de potencia de un 37% de eficiencia bajo las condiciones establecidas en el diseño y una potencia instalada de 50MW$_{el}$, el sistema de almacenamiento con una capacidad de 7,5h debe ser capaz de almacenar alrededor de 1000MWh$_{th}$ de energía térmica.

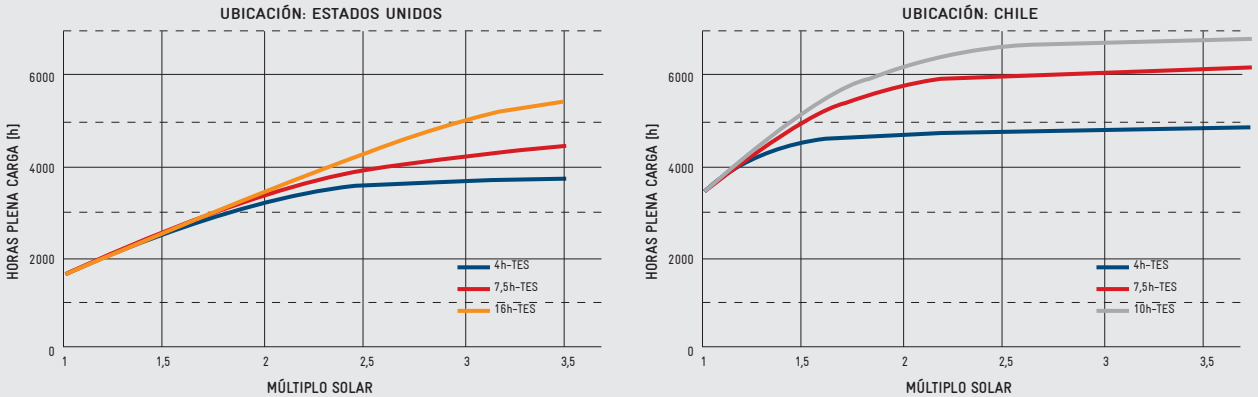


FIGURA 5: RELACIONES PRINCIPALES ENTRE EL MÚLTIPLO SOLAR (MS), LAS HORAS A PLENA CARGA Y EL TAMAÑO DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO.

Como se mencionó anteriormente, el tamaño del sistema de almacenamiento térmico influye de forma directa en el tamaño del campo solar. Esta influencia se refleja en el "múltiplo solar (MS)". El MS es un factor que describe la relación entre el tamaño del campo solar instalado y el tamaño del campo solar necesario para operar la central de CSP a plena carga bajo términos definidos de condiciones de radiación. Para cargar el sistema de almacenamiento y paralelamente producir energía eléctrica se requiere de un excedente de energía, lo que da como resultado un mayor campo solar. Por ejemplo, con un múltiplo solar de 2, el campo solar es el doble del necesario para una operación eléctrica pura. La Figura 5 (izquierda) muestra la relación principal entre el MS, el tamaño del sistema de almacenamiento y el factor de capacidad. Este análisis se realizó en base a (Turchi, Mehos, Ho, & Kolb, 2010) para una central con colectores ciíndrico parabólicos de 100MW$_{el}$ en EE.UU. Desde luego este análisis debe realizarse para cada lugar y tecnología, pero el comportamiento básico es válido para la mayoría de los lugares del mundo. Para mostrar la influencia de la radiación solar en este comportamiento, el gráfico de la Figura 5 (derecha) muestra un análisis similar, calculado para un lugar situado en el norte de Chile con una radiación directa nominal anual extremadamente elevada de alrededor de 3200kWh/m², según la estación de medición terrestre "Crucero II" (Comuna de María Elena, Antofagasta). La influencia es claramente visible en el aumento de las horas a plena carga.

Considerando esta relación, no resulta adecuado construir un sistema de almacenamiento térmico (TES, por sus siglas en inglés) con capacidad de 4h con un múltiplo solar superior a 2 porque no existe un beneficio adicional derivado al incrementar las horas de plena carga. Por otra parte, para un sistema de almacenamiento con capacidad de 16h se requiere un múltiplo solar de 3 o superior.

El tamaño del sistema de almacenamiento también puede verse afectado por parámetros económicos. Dependiendo del diseño del mercado, puede ser adecuado construir únicamente sistemas de almacenamiento pequeños (como en Sudáfrica y EE.UU. con sus tarifas para horarios de punta de demanda) o construir sistemas de almacenamiento de gran tamaño para operación con carga básica (como en España con la implementación del sistema de feed-in tariff[2] independiente del tiempo). Para Chile el tamaño de almacenamiento óptimo dependerá de la aplicación específica pero estará principalmente determinado por la reducción de los costos de generación específicos de la energía producida.

2 Feed-in Tariff (FIT, por sus siglas en inglés): instrumento normativo que impulsa el desarrollo de las ERNC mediante el establecimiento de una tarifa especial, premio o sobreprecio, por unidad de energía eléctrica inyectada en la red por unidad de generación ERNC.

CONCLUSIÓN:

Los factores relevantes para el desarrollo y evaluación de los sistemas de almacenamiento de energía térmica son los siguientes:

• Rango de temperatura útil: El material de almacenamiento está limitado a un nivel máximo y mínimo de temperatura, definido por las propiedades del propio material o bien por el sistema de almacenamiento.

Eficiencia del sistema de almacenamiento: La eficiencia del sistema de almacenamiento se calcula mediante la relación entre el calor producido y el calor de entrada al sistema de almacenamiento. Un segundo parámetro clave es el autoconsumo eléctrico.

• Capacidad de almacenamiento volumétrico específica: Describe la capacidad del medio de almacenamiento para almacenar energía térmica en un volumen dado.

• Tamaño del sistema de almacenamiento: El tamaño del sistema de almacenamiento es altamente dependiente de factores económicos o relacionados con la red. El tamaño del sistema de almacenamiento se relaciona con el tamaño del campo solar, este puede permitir una acumulación de calor hasta 16 horas.

2.1.2. Integración en centrales de CSP

En cuanto a la integración del sistema de almacenamiento térmico en una central de CSP, existen dos posibilidades, representadas en la Figura 6. El sistema de almacenamiento siempre se emplaza entre el campo solar (o el receptor solar) y el bloque de potencia. Para simplificar el diagrama, esta figura no muestra dichos componentes sino solo las interconexiones.

Con el método directo (Figura 6a) un medio es utilizado como material de almacenamiento y también como fluido de transferencia de calor (HTF, por sus siglas en inglés). El medio se almacena en un tanque frío, se calienta en el receptor y luego se almacena en un tanque caliente. El medio caliente luego se envía directamente al bloque de potencia.

El método indirecto (Figura 6b) debe utilizarse si el material de almacenamiento y el HTF utilizado en el campo solar son diferentes. El calor es transferido desde el HTF (calentado en el campo solar) hacia el material de almacenamiento mediante intercambiadores de calor especiales. Este método da como resultado dos ciclos cerrados diferentes. Para descargar el sistema de almacenamiento el calor es nuevamente transferido mediante el intercambiador de calor desde el material de almacenamiento hacia el HTF.

La principal dificultad del sistema indirecto tiene relación con la eficiencia del intercambiador de calor entre el material de almacenamiento y el HTF del campo solar. Para aumentar la eficiencia, los intercambiadores de calor están diseñados para maximizar la superficie de la pared entre los dos fluidos, minimizando al mismo tiempo la resistencia al flujo del fluido a través del intercambiador de calor. No obstante, siempre hay un gradiente térmico necesario entre el medio primario y el secundario, lo cual produce una disminución en la eficiencia total del sistema.

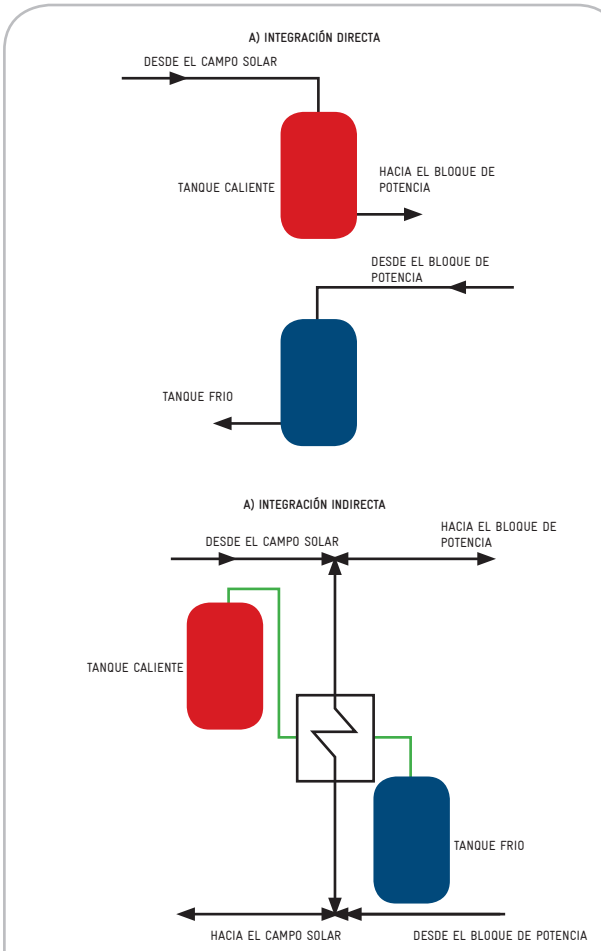


FIGURA 6: CONFIGURACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA INTEGRACIÓN DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO EN UNA CENTRAL DE CSP

CONCLUSIÓN:

La integración indirecta del sistema de almacenamiento de energía térmica requiere de intercambiadores de calor. Existen diferentes materiales para el fluido de transferencia de calor necesario.

Los sistemas de almacenamiento más modernos que pueden integrarse son los siguientes:

- **Sistemas con torre solar: métodos de almacenamiento directos**
- **Sistemas lineales Fresnel: métodos de almacenamiento directos**
- **Sistemas con colectores cilíndrico parabólicos: métodos de almacenamiento indirectos**

2.2. DESARROLLO HISTÓRICO DE LOS SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO TÉRMICO

Desde la instalación de los primeros sistemas de CSP en los años 60's, los sistemas de almacenamiento térmico constituyen un elemento clave en su desarrollo. La primera central con colectores cilíndrico parabólicos construida en Egipto contaba con tanques para almacenar el agua saturada, similares a los "tanques Ruth" utilizados actualmente.

En la década de los 80's las primeras centrales comerciales de CSP con colectores cilíndrico parabólicos con aceite térmico como fluido de transferencia de calor (HTF) se construyeron en Estados Unidos. En la primera central SEGS 1 se incluyó un sistema de almacenamiento con aceite térmico utilizando un sistema directo de dos tanques. En el primer tanque se almacena el aceite térmico frío y es bombeado al campo solar. El HTF se calienta al pasar por el campo solar y se almacena en el tanque caliente. Desde el tanque caliente el aceite térmico se transfiere al bloque de potencia. Con este sistema se realizó la primera implementación de un sistema de 2 tanques en un sistema comercial de CSP. El sistema resultó dañado por un incendio en 1999 y no fue reemplazado.

Con el desarrollo de las centrales de CSP, el logro de mayores niveles de eficiencia en el conjunto del sistema cobró mayor importancia. Una forma de aumentar la eficiencia es utilizando un HTF que pueda alcanzar temperaturas más elevadas. El sistema con aceite térmico, especialmente el aceite térmico de base mineral utilizado en SEGS 1, es limitado en cuanto a su rango térmico superior. El sistema de almacenamiento instalado en SEGS 1 estaba limitado a temperaturas de hasta 307°C. La capacidad calorífica era de 25kWh$_{th}$/m³ con un costo de materiales alrededor de 4,2USD/kWh$_{th}$ (Hermann & Kearney, 2000). En SEGS 1 se utilizó aceite térmico de base mineral que podía almacenarse en recipientes no presurizados. Posteriormente con la tendencia en cuanto al incremento de la temperatura de funcionamiento se utilizaron nuevos aceites térmicos sintéticos. Estos nuevos aceites térmicos tienen una alta presión de vapor, por lo que se requieren tanques presurizados que son muy costosos o incluso de imposible fabricación en los tamaños necesarios para las grandes centrales de CSP, lo cual marcó el fin de los sistemas de almacenamiento con aceite térmico.

Para lograr nuevas formas de almacenar calor se implementaron métodos indirectos. Con el sistema de dos tanques a base de sal fundida se instaló el primer método de almacenamiento indirecto en la central Andasol 1 en España. El HTF caliente procedente del campo solar pasa por un intercambiador de calor donde el calor se transfiere a la sal fundida del tanque frío. La sal fundida caliente se almacena en un tanque caliente. La sal fundida es estable a temperaturas elevadas y puede almacenarse en recipientes no presurizados. Con este sistema, temperaturas de hasta 500°C en el sistema de almacenamiento son teóricamente posibles. Considerando una temperatura máxima de 400°C, puede lograrse una capacidad calorífica volumétrica de 83kWh$_{th}$/m³ con costos de materiales de alrededor de 16USD/kWh$_{th}$ (Hermann & Kearney, 2000). Las dificultades que presentan los sistemas con sal fundida son la transferencia de calor desde el HTF hacia la sal fundida y la temperatura de solidificación de la sal fundida a 270°C. En 1999 se implementó un primer método directo de almacenamiento de calor en un receptor de sal fundida en la central de torre solar piloto Solar Two (California, EE.UU.). La sal fundida se bombeaba directamente desde el tanque frío al receptor, se calentaba hasta alcanzar los 565°C y luego se la almacenaba en un tanque caliente.

Desde la realización del primer almacenamiento mediante un sistema de sal fundida se implementaron sucesivas innovaciones en el diseño de los sistemas de almacenamiento considerando la posición de los intercambiadores de calor o el uso de nuevos materiales para los tanques.

La mayoría de las tecnologías de almacenamiento implementadas en las centrales de CSP también tienen aplicaciones industriales. Estas aplicaciones suelen involucrar rangos de temperatura inferiores, por ejemplo, en el caso de los sistemas de recuperación de calor procedente de residuos. Las experiencias obtenidas en este sector se transfieren al desarrollo de sistemas de almacenamiento para centrales de CSP.

A fin de tener un panorama general de la situación actual de los sistemas de almacenamiento térmico para CSP, la Figura 7 muestra los desarrollos más importantes. Los estados de desarrollo de las tecnologías se dividen en "Investigación básica" con desarrollos preliminares y centrales piloto, "Operación comercial" con las primeras centrales en funcionamiento y "Mayor desarrollo" para tecnología más madura que continúa optimizándose en base a experiencias operativas. Los desarrollos esperados para los próximos cinco años se indican con línea punteada.

Dentro de las tecnologías "de punta" se incluyen sistemas de almacenamiento instalados en centrales de CSP comerciales. Estas tecnologías (tanques Ruth, almacenamiento con sal fundida y cerámica de tipo panal de abeja) se describen en detalle en el siguiente capítulo.

CONCLUSIÓN:

Desde la instalación de la primera central de CSP, los sistemas de almacenamiento térmico han sido una parte esencial de esta tecnología. Con el desarrollo de la tecnología relacionada con la CSP para posibilitar mayores temperaturas y mejores niveles de eficiencia se integraron nuevos conceptos de almacenamiento térmico. Entre las tecnologías más modernas se encuentran las siguientes:

- **Sistema de almacenamiento con sales fundidas: método de almacenamiento indirecto para grandes capacidades.**
- **Sistema con tanques Ruth: métodos de almacenamiento directo, tales como acumulador de vapor de corto tiempo.**
- **Sistema de almacenamiento de cerámica tipo panal de abeja: método de almacenamiento directo para sistemas basados en aire.**

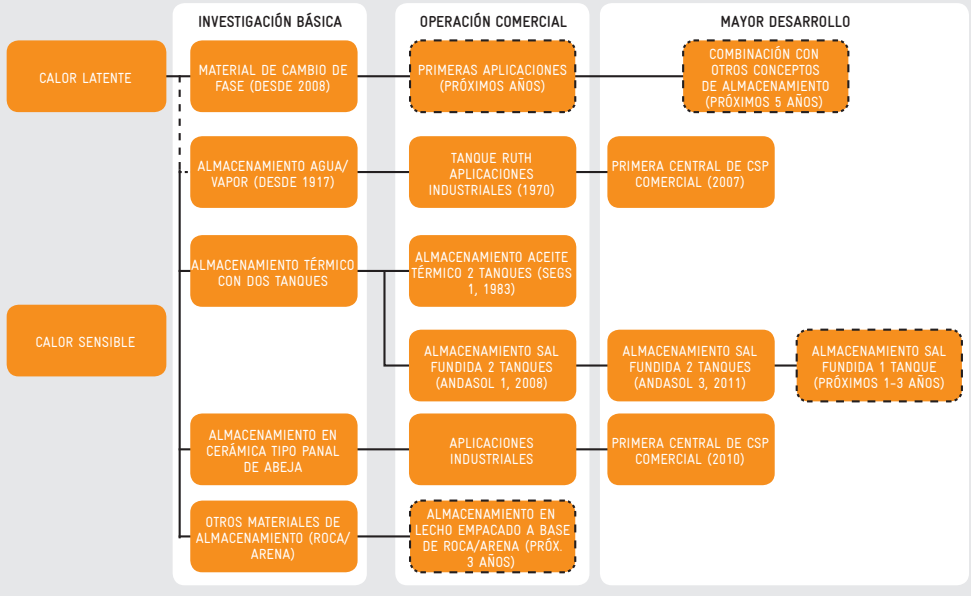


FIGURA 7: RESUMEN DE LOS PRINCIPALES CONCEPTOS DE ALMACENAMIENTO Y SU DESARROLLO (LÍNEA PUNTEADA: DESARROLLO ESPERADO)

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

2.3. DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA

Considerando su presencia comercial actual, los siguientes capítulos describen los tres sistemas de almacenamiento implementados.

2.3.1. Sistema de almacenamiento con sales fundidas

El sistema de almacenamiento más conocido en el sector de CSP debido a su aplicación en diversas centrales en todo el mundo es el sistema de almacenamiento con sales fundidas. Hasta este momento, es también el único sistema de almacenamiento térmico a largo plazo para centrales de CSP con aplicación comercial. El medio de almacenamiento comúnmente utilizado, también denominado "sal solar", es la mezcla eutéctica de 60% de $NaNO_3$ (nitrato de sodio) y 40% KNO_3 (nitrato de potasio). El punto de fusión de esta mezcla se encuentra en el rango de los 220°C y el punto de fusión mínimo eutéctico es aproximadamente 210°C para una mezcla de 50% de $NaNO_3$ y 50% de KNO_3. La sal solar es químicamente estable para temperaturas de hasta 570°C aproximadamente.

Principio de almacenamiento

El principio de almacenamiento depende del medio de transferencia de calor utilizado para la tecnología de CSP. Si la sal fundida es el medio de transferencia de calor, el sistema de almacenamiento está directamente integrado en el ciclo de los medios de transferencia de calor (sistema directo con sales fundidas). En el caso de otros medios, se usa un ciclo con sistema de almacenamiento externo (sistema indirecto con sales fundidas).

Aplicación para sales fundidas como medio de transferencia de calor (sistema directo con sales fundidas)

El sistema de almacenamiento directo con sales fundidas consta de dos tanques de almacenamiento integrados directamente en el ciclo de las sales fundidas de la central. El denominado tanque caliente almacena la sal caliente (aprox. 565°C) y el tanque frío almacena la sal "fría" (aprox. 290°C). Con esta configuración se utiliza el rango operativo máximo de la sal solar. La Figura 8 muestra la integración de un sistema de almacenamiento directo con sal fundida de dos tanques. El tanque frío está representado en naranja y el tanque caliente en rojo. La integración directa en el ciclo de las sales fundidas asegura un volumen constante de sal caliente y sal fría dentro de los tanques. En condiciones normales de funcionamiento hay un flujo constante de entrada y salida en ambos tanques. Durante la noche el ciclo de las sales fundidas continúa, si bien no se transmite calor desde el receptor a las sales fundidas frías. La sal fundida caliente del tanque caliente se utiliza para mantener en funcionamiento la producción de vapor, mientras la sal fría reemplaza la sal caliente extraída dentro del tanque caliente. Este sistema fue aplicado en la central energética Gemasolar en España.

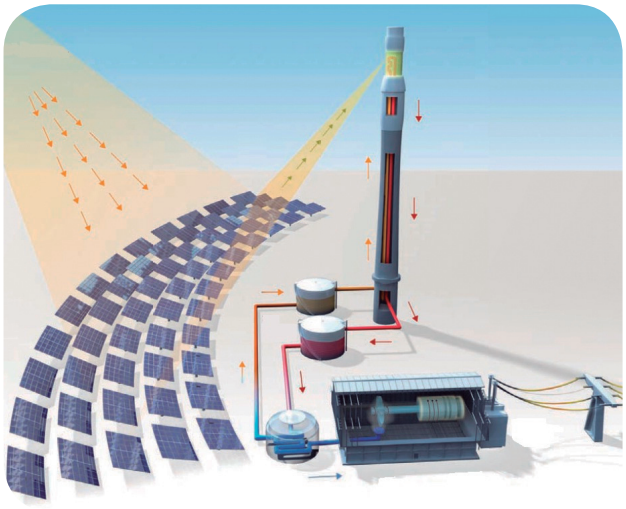


FIGURA 8: INTEGRACIÓN DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DIRECTO CON SALES FUNDIDAS Y DOS TANQUES EN UNA CENTRAL CON TORRE DE ENERGÍA SOLAR (AQUÍ: CENTRAL GEMASOLAR) (ADAPTADO DEL FOLLETO TORRESOL ENERGY DE GEMASOLAR)

Los dos tanques de sal fundida construidos en Gemasolar tienen un diámetro de 23m y una altura aproximada de 10,5m. Las diferentes bombas (fría y caliente) para la sal fundida están ubicadas cerca del tanque correspondiente. Hay unidades adicionales de cintas calefactoras para el calentamiento de las tuberías y los intercambiadores de calor para impedir el congelamiento del sistema. Estos calentadores también están instalados en ambos tanques (Azcárraga, 2012).

Con la integración de un sistema térmico en una central con torre solar, todos los fluidos necesarios (HTF si es necesario y el medio de almacenamiento) están concentrados en una superficie pequeña. A diferencia de la integración indirecta de un pequeño sistema de almacenamiento térmico en una central con colectores cilíndrico parabólicos, esto permite menores pérdidas de calor y costos de mantenimiento inferiores para el sistema.

Aplicación para otros medios de transferencia de calor (indirecto con sales fundidas)

El sistema de almacenamiento indirecto con sales fundidas no se integra de forma directa al ciclo de transferencia de calor. El sistema consta de dos tanques de almacenamiento para la sal equipados con bombas para las sales fundidas. Los tanques están conectados por una tubería que contiene diversos intercambiadores de calor. Los intercambiadores de calor sirven para transferir el calor desde el medio de transferencia de calor (por ej: un fluido orgánico sintético o agua/vapor) hacia las sales fundidas o viceversa. Este sistema se aplicó en las centrales de energía Andasol 1-3 en España. La Figura 9 muestra una configuración esquemática típica.

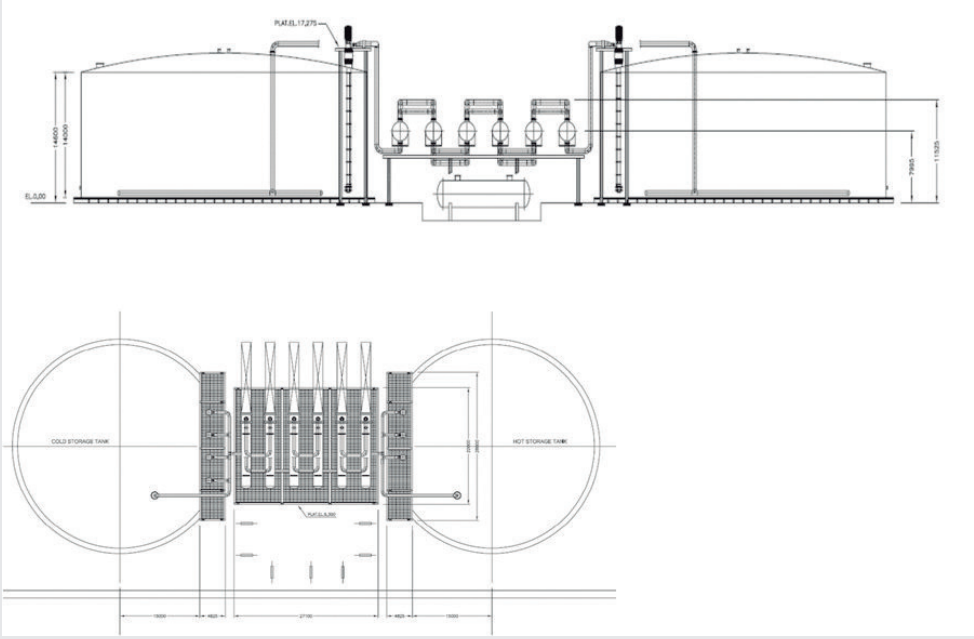


FIGURA 9: ESQUEMA DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA CON SALES FUNDIDAS Y DOS TANQUES, VISTAS LATERAL Y SUPERIOR, CENTRAL ANDASOL 1 (120216)

El tanque de la izquierda es el tanque frío y el de la derecha el caliente. La sal fundida, cuando está fría, se almacena dentro del tanque frío. En este estado la sal fundida se encuentra a una temperatura aproximada de 290°C, suficiente para mantener una distancia térmica con el punto de cristalización de la mezcla de sal, que ronda los 220°C. Si la sal fundida alcanza dicha temperatura, se cristaliza, dañando el sistema, dejándolo fuera de funcionamiento.

El cuerpo principal del tanque caliente es de acero inoxidable debido a los esfuerzos térmicos y la presencia del material de almacenamiento. Si bien el tanque frío podría estar construido en acero al carbono, para permitir que el sistema almacene todas las sales fundidas en un mismo tanque en caso de emergencia, los tanques suelen construirse en acero inoxidable.

En el proceso de carga, la sal fundida del tanque de almacenamiento frío se bombea por las tuberías dotadas de "baterías" de intercambiadores de calor, donde el calor proveniente del medio de transferencia de calor se transfiere a la sal. Para incrementar el desempeño del sistema en condiciones de carga parcial, se instalan dos tuberías paralelas que permiten el uso de una sola tubería para cargas parciales y de ambas funcionando en paralelo para plena carga. Para la descarga el proceso se revierte. El calor se transfiere de regreso al medio de transferencia de calor y la sal fundida, ahora fría, se almacena nuevamente en el tanque frío.

Comparación de los dos métodos

Puede establecerse una comparación entre los dos sistemas tomando como ejemplo las centrales Gemasolar y Andasol 1, ambas con diferentes capacidades de almacenamiento y potencia instalada pero similar capacidad térmica calorífica de aproximadamente 1000MWh$_{th}$. La Tabla 2 presenta los parámetros técnicos de ambos sistemas según (Bauer, Breidenbach, Pfleger, Laing, & Eck, 2012). El efecto del rango térmico útil del medio de almacenamiento es evidente. El método indirecto requiere tres veces más de sal fundida, lo que eleva los costos del sistema.

Parámetros técnicos

Hasta la fecha, esta tecnología es el único sistema de almacenamiento térmico a largo plazo disponible en el mercado, aplicado y comprobado. Sin embargo, al igual que otras tecnologías de almacenamiento, también presenta algunas desventajas. Por ejemplo, el precio de la sal fundida es muy volátil y depende en gran medida del mercado y la disponibilidad, lo que provoca fluctuaciones en los costos de inversión del sistema. Durante el almacenamiento es muy importante no alcanzar el punto de cristalización de la sal fundida, ya que si ello ocurre dentro de los tanques, todo el sistema puede verse drásticamente afectado y quedar inutilizable. El punto de cristalización de una mezcla de sal de 60% de $NaNO_3$ y

TABLA 2: COMPARACIÓN DEL MÉTODO DIRECTO E INDIRECTO

PROYECTO	MÉTODO DE ALMACENAMIENTO	CAPACIDAD TÉRMICA [MWHTH]	MASA INVENTARIO [TONELADAS]	TEMPERATURA [°C]		CAPACIDAD CALORÍFICA VOLUMÉTRICA [KWH/M³]
				TANQUE FRÍO	TANQUE CALIENTE	
Gemasolar	directo	1000	8.500	290	565	210
Andasol 1	indirecto	1010	28.500	292	386	75

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

40% de KNO_3 es aprox. 220°C y la estabilidad térmica es hasta los 580°C aproximadamente. Por razones de seguridad se mantiene una distancia térmica con respecto a estos dos puntos importantes. Los tanques para un sistema con capacidad aprox. de 1000MWh_{th} tienen un diámetro aproximado de 38,5m y una altura aproximada de 14m y la masa del sistema es de 31.000t, lo cual requiere un espacio significativo. Basándose en aspectos constructivos y la propia experiencia, este es de algún modo el tamaño máximo de almacenamiento de sal fundida. Para lograr una capacidad mayor, se construyen diversos sistemas de 2 tanques en paralelo, permitiendo así un sistema limitado modular. La Estación Generadora Solana (Arizona, EE.UU.; 2013) cuenta con el mayor sistema de almacenamiento térmico; ofrece una capacidad de almacenamiento de 6 horas para una central con capacidad instalada de 280MW_{el}. El sistema de almacenamiento térmico consta de seis sistemas de 2 tanques de sal fundida en paralelo.

La eficiencia del almacenamiento está definida por dos factores principales: en primer lugar, las pérdidas térmicas y en segundo lugar, pérdidas ocasionadas por la transferencia energética a través del intercambiador de calor. Ambos factores dependen en gran medida del diseño del sistema de almacenamiento. En el caso de métodos directos sin transferencia calorífica, solamente las pérdidas térmicas de los tanques y las tuberías resultan relevantes.

La pérdida de calor del tanque de almacenamiento consiste en la convección hacia el ambiente a través de las paredes del tanque y los cimientos. Utilizando aislación térmica altamente eficiente en las partes relevantes del tanque (tanque, tuberías, intercambiador de calor, etc.), es posible minimizar las pérdidas de calor para lograr valores cercanos entre el 2% y 6% (Nandi, Bandyopadhyay, & Banerjee, 2012), (Herrmann, Speicherrelevanz für CSP, Technologiebeispiel Flüssigsalzspeicher, 2013).

Como ya se explicó, siempre es necesario cierto gradiente térmico para transferir el calor con el intercambiador de calor. Por lo tanto, la temperatura del HTF luego de la descarga siempre es inferior a la del HTF del campo solar. Este efecto consiste en una disminución de la exergía a través del almacenamiento. Para cuantificar dicha disminución se utiliza la relación de las eficiencias del ciclo de Carnot durante la carga y descarga. Con un gradiente térmico típico de 10K cada uno, pueden alcanzarse valores de eficiencia de ida y vuelta de los intercambiadores de alrededor del 99,5%. Sumado a las pérdidas térmicas, los sistemas comerciales alcanzan valores de eficiencia de almacenamiento total cercanos al 95% (Ma, Glatzmaier, Turchi y Wagner, 2012).

El autoconsumo eléctrico del sistema con sales fundidas está dominado por dos consumidores principales: los cintas calefactoraseléctricas necesarias para impedir el congelamiento del sistema y las bombas para la sal fundida, que permiten el flujo a través de los intercambiadores de calor. La energía de las bombas depende de diversos factores como la eficiencia de la bomba y la velocidad de flujo; para un sistema del tipo del de Andasol la energía necesaria para un ciclo (carga y descarga) es estimada en 1,8MWh_{el}. (Nandi, Bandyopadhyay y Banerjee, 2012).

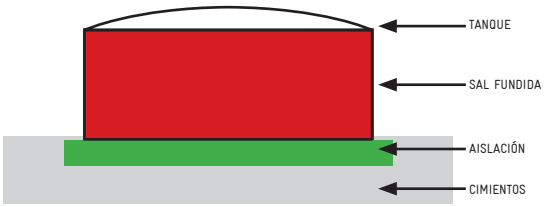


FIGURA 10: DIAGRAMA DEL TANQUE DE SAL FUNDIDA Y SUS CIMIENTOS

Los cimientos del tanque son parte fundamental del sistema debido a que deben resistir tanto las grandes masas como también las elevadas temperaturas del sistema. El hormigón utilizado para los cimientos tiene un límite de estabilidad térmica que ronda los 80 – 90°C. Por lo tanto, los cimientos deben estar dotados de una aislación independiente y sistemas adicionales de enfriamiento por aire para evitar un aumento en la temperatura del hormigón, tal como lo muestra la Figura 10.

En la fase de diseño de los cimientos es necesario tener en cuenta el efecto a largo plazo del constante cambio de la masa de sal fundida caliente. El peso y el ciclo de carga/descarga de la masa de sal fundida pueden ocasionar un adelgazamiento de la aislación o una deformación de la base del tanque, lo cual puede elevar la temperatura del hormigón.

Operación y mantenimiento

Existe bastante experiencia en el funcionamiento de sistemas de almacenamiento de dos tanques con sales fundidas. Según información entregada por un proveedor de sistemas de almacenamiento de sal fundida con más de 20 años de experiencia, el esfuerzo de mantenimiento es menor si se realiza del siguiente modo:

- **Bombas:** Mantenimiento predictivo y análisis de vibraciones durante el funcionamiento. Se recomienda una inspección cada 5000 horas de funcionamiento.
- **Tuberías/cintas calefactoras:** Revisión semanal de la tubería/cintas calefactoras y gabinetes de distribución.
- **Instrumental:** Revisión anual del instrumental.
- **Intercambiadores de calor:** Inspección anual de los intercambiadores de calor que incluya mantenimiento predictivo, análisis de condiciones de funcionamiento y desempeño.

La mayor parte del trabajo de mantenimiento puede realizarse durante el funcionamiento diario de modo que el impacto en el funcionamiento de la central es mínimo; la disponibilidad del sistema con sales fundidas es del 99% y es superior a la del resto de los componentes (bloque de potencia y campo solar) de la central de CSP (Azcárraga, 2012). No se necesitan equipos especiales para el mantenimiento.

Según el proveedor, la sal fundida no necesita ser reemplazada durante un periodo de 20 años de funcionamiento de la central, tal como lo demuestra la experiencia operativa hasta la fecha.

TABLA 3: ANTECEDENTES DE CENTRALES DE CSP CON SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO CON SAL FUNDIDA (EXTRACTO)

NOMBRE DEL PROYECTO	CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO	EN FUNCIONAMIENTO	TECNOLOGÍA CSP	PROPIETARIO / CONTRATISTA DE EPC
Andasol 1	7,5h ~1000MWh$_{th}$	11/2008	Colectores cilíndrico parabólicos	ACS Cobra Group / UTE CT Andasol
Andasol 2	7,5h ~1000MWh$_{th}$	06/2009	Colectores cilíndrico parabólicos	ACS Cobra Group / UTE CT Andasol
Andasol 3	7,5h ~1000MWht$_{h}$	08/2011	Colectores cilíndrico parabólicos	Ferrostaal / Solar Millenium / RWE /Rhein E. / SWM
Archimede	~8h ~100MWh$_{th}$	07/2010	Colectores cilíndrico parabólicos (directo con sales fundidas)	ENEL / ENEL
Solana	~6h, ~4500MWh$_{th}$	10/2013	Colectores cilíndrico parabólicos	Abengoa Solar / Abengoa Solar
Gemasolar	15h ~800MWh$_{th}$	04/2011	Torre solar (directo con sales fundidas)	Torresol / UTE C.T Solar Tres

Los sistemas de almacenamiento con sal fundida y 2 tanques son por el momento la opción favorita para centrales de CSP. Sin embargo, están apareciendo nuevos sistemas de almacenamiento, que transitan a paso lento pero firme las etapas de desarrollo y demostración, para convertirse pronto en una alternativa de almacenamiento competitiva. Para continuar siendo competitivos incluso para sistemas de almacenamiento futuros, los proveedores de sistemas de almacenamiento con sal fundida están continuamente intentando mejorar su sistema. Dichas mejoras se pueden agrupar en dos categorías principales: la mejora del material de almacenamiento y la mejora del diseño de la central. El capítulo 5.1.1 analiza estos desarrollos.

RESUMEN:

El sistema de almacenamiento con sales fundidas almacena calor sensible en una mezcla de sales de nitrato. Según el fluido de transferencia de calor utilizado, puede implementarse como método de almacenamiento directo o indirecto. Las sales de nitrato deben mantenerse en fase líquida durante todo el funcionamiento del sistema de almacenamiento, por lo que es necesario en todo momento evitar que la temperatura del sistema caiga por debajo de cierto límite.

Los sistemas de almacenamiento con sales fundidas y dos tanques son el tipo de sistema de almacenamiento térmico a largo plazo más moderno para aplicación en diversas tecnologías de CSP, tanto para almacenamiento directo como indirecto. Es capaz de brindar todo tipo de rangos de capacidad necesarios para la producción de energía solar. Debido a su extensa trayectoria y experiencia operativa, es prácticamente el único sistema de almacenamiento térmico de largo plazo rentable del mercado.

Los costos de los materiales de almacenamiento son elevados y volátiles ya que dependen del comportamiento del mercado. Los costos de operación y mantenimiento son fácilmente predecibles y económicamente justificables.

2.3.2. Sistema de tanques Ruth

Los sistemas de CSP con generación directa de vapor (GDV) requieren de un método directo para almacenar el calor debido a las dificultades que implica transferir calor latente (ver capítulo 2.1.2.). La utilización de recipientes a presión para el almacenamiento directo de vapor saturado o sobrecalentado no es económicamente viable. En los sistemas más modernos actualmente se utilizan acumuladores de vapor. Dentro de este sistema el calor se almacena en agua líquida saturada y presurizada. Debido a sus propiedades termodinámicas, existe una gran diferencia entre la capacidad calorífica volumétrica del vapor saturado y del agua saturada, por lo que se requiere de un recipiente mucho más pequeño si se utiliza agua saturada. Si bien es técnicamente viable construir acumuladores de vapor de gran capacidad, los costos son muy elevados. Por lo tanto, en las centrales de CSP se instalan acumuladores de vapor con factores de capacidad muy reducida de 1h como máximo.

La Figura 11 muestra un esquema de acumulador de vapor. El diseño y la capacidad del sistema de tanques Ruth depende principalmente de la presión en el sistema de almacenamiento. A mayor presión, mayor capacidad volumétrica, pero por otro lado se requiere de un recipiente de paredes bien gruesas para resistir las fuerzas, lo que da como resultado un límite económico de hasta 70 bar.

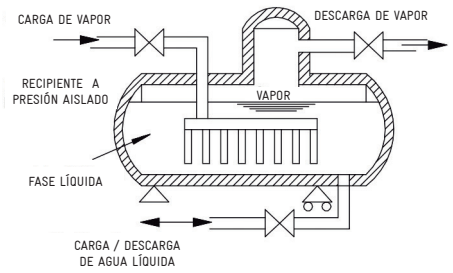


FIGURA 11: ESQUEMA DE ACUMULADOR CON PRESIÓN DESLIZANTE (STEINMANN Y ECK, 2006)

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Para cargar el acumulador, el vapor es soplado hacia la fase líquida. El vapor entrante se condensa en líquido o pasa a la fase de vapor. El vapor que alcanza la fase de vapor aumenta la presión dentro del recipiente, produciendo una temperatura de saturación más elevada. Como resultado, se condensa una mayor cantidad de vapor en la fase líquida. Bajo este principio la cantidad de vapor en el sistema se mantiene siempre en el mismo nivel (cerca del 10%).

Al reducir la presión en el recipiente, se produce vapor saturado y el sistema de almacenamiento se descarga, lo cual produce una disminución continua de la presión. Dado que el medio de almacenamiento y el de trabajo es el mismo, es posible alcanzar altos índices de descarga, sólo limitados por los parámetros de diseño de la tubería.

Otro método para cargar o descargar el sistema de almacenamiento es el intercambio de agua saturada en la base de los recipientes (tal como lo muestra la Figura 11), aunque este no es el método principal utilizado.

Parámetros técnicos

La capacidad de almacenamiento volumétrico del acumulador de vapor depende de las propiedades termodinámicas del agua. La Figura 12 muestra las capacidades de almacenamiento resultantes para diferentes niveles de presión asumiendo un sistema de almacenamiento que se descarga a una presión de 20 bar.

Dado que el agua del sistema de almacenamiento se mantiene siempre a nivel de saturación, los rangos térmicos dentro del sistema oscilan entre 210°C (20 bar) y un máximo de 285°C (70 bar).

Los sistemas de tanques Ruth más modernos utilizan una presión máxima de 55 bar. Para un volumen de almacenamiento de 100m³, puede almacenarse cerca de 3,5MWhth de energía térmica en el sistema, lo cual da como resultado un peso del sistema de aproximadamente 90 t. La principal dificultad en la construcción de este sistema es la altísima presión que se genera en su interior, por lo que se requiere de acero de alta calidad (por ej. 1,6368) para mantener el espesor de las paredes dentro de un rango factible en términos económicos (menor a 75mm). Mediante el uso de aislación térmica se reducen las pérdidas de calor del sistema a un mínimo cercano al 2% de la energía almacenada dentro del rango de carga total. Comparado con la energía producida por el campo solar, las pérdidas térmicas son inferiores al 0,1%. El autoconsumo eléctrico es insignificante (Prieto, A. y F, 2012).

Los recipientes de almacenamiento se construyen en las instalaciones del fabricante y se entregan en el lugar de la central, lo cual reduce al mínimo el tiempo de construcción. Los recipientes pueden instalarse a nivel del suelo con cimientos de hormigón (como en el caso de Planta Solar) o incluso en altura sobre una estructura de acero (como en Puerto Errado 2). Aparte de la cuestión del peso del recipiente, no existen otros requerimientos a tener en cuenta para los cimientos.

Como ya se mencionó, construir grandes recipientes de almacenamiento no es económicamente factible. Para aumentar la capacidad de almacenamiento se aumenta la cantidad de recipientes, lo cual da como resultado un sistema de almacenamiento de elevada modularidad y disponibilidad. Dado que el sistema no incluye componentes móviles, casi no se requieren trabajos de mantenimiento más allá de las inspecciones periódicas.

El acumulador de vapor puede integrarse directamente en la central mediante el uso de generación directa de vapor, tal como lo muestra la Figura 13.

Un excedente de vapor del campo solar es almacenado en el acumulador de vapor. Si la demanda de vapor por parte de la turbina supera la cantidad de vapor producida en el campo solar, se utiliza el vapor almacenado para completar e incluso reemplazar el vapor del campo solar.

RESUMEN:

El sistema de tanques Ruth es un método de almacenamiento directo de vapor saturado. Se puede implementar en sistemas de CSP con generación directa de vapor (como Lineal Fresnel o Torre Solar). El factor de capacidad de este tipo de sistemas está limitado a 1h y se utiliza como sistema de almacenamiento a mediano plazo en las centrales de CSP. El sistema consta de varios recipientes de almacenamiento, que permiten una elevada modularidad y disponibilidad del sistema. El principio de almacenamiento se implementó en los primeros años del siglo XX y es de uso común en la industria de procesos. Se implementa en numerosas centrales de CSP como PE2 (Lineal Fresnel) o PS10 y PS20 (Torre Solar).

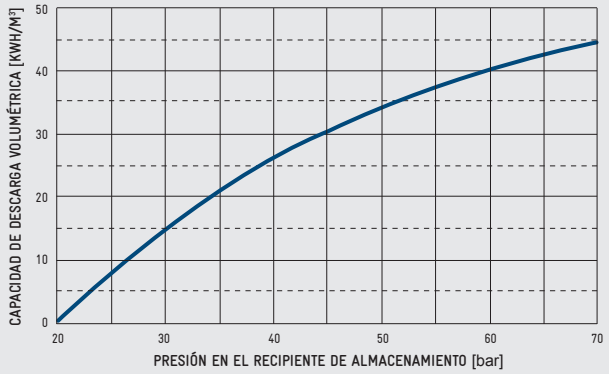


FIGURA 12: CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO VOLUMÉTRICO PARA UN SISTEMA DE TANQUES RUTH

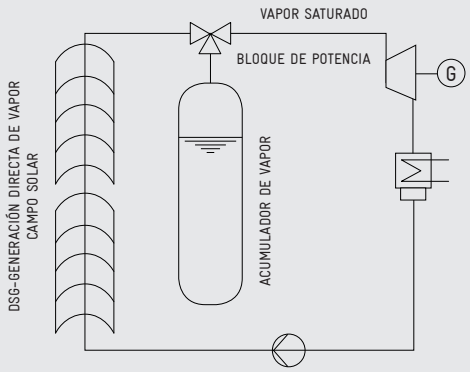


FIGURA 13: ESQUEMA DE CENTRAL TERMOSOLAR CON GENERACIÓN DIRECTA DE VAPOR CON ACUMULADOR DE VAPOR INTEGRADO (STEINMANN Y ECK, 2006)

TABLA 4: ANTECEDENTES DE ALMACENAMIENTO DE VAPOR EN CENTRALES DE CSP (EXTRACTO)

NOMBRE DEL PROYECTO	CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO	EN FUNCIONAMIENTO	TECNOLOGÍA CSP	PROPIETARIO / CONTRATISTA DE EPC
PE 2 (Puerto Errado 2)	0,25h	2012	Lineal Fresnel	Novatec Solar
Alba Nova 1	1h	En construcción	Lineal Fresnel	Solar Euromed
Planta Solar 10	1h	2007	Torre solar	Abengoa Solar
Planta Solar 20	1h	2009	Torre solar	Abengoa Solar
Khi Solar Uno	2h	En construcción	Torre solar	Abengoa Solar

2.3.3 Sistema de almacenamiento de cerámica tipo panal de abeja

Para almacenar calor a alta temperatura puede utilizarse el sistema de almacenamiento tipo panal de abeja, que combina un fluido de transferencia de calor gaseoso (en general aire) con un medio de almacenamiento sólido. Ambos medios están en contacto directo entre sí y el intercambio de calor se produce mientras el HTF fluye a través del medio de almacenamiento.

Con numerosas aplicaciones industriales que involucran altas temperaturas, este principio se utiliza para sistemas de almacenamiento de tipo regenerador, tales como el oxidador térmico regenerativo (RTO, por sus siglas en inglés) en sistemas industriales de purificación de aire o como cámaras regeneradoras en la industria del vidrio. Se pueden utilizar diversos materiales, tales como alúmina sílice u otros cerámicos. La principal desventaja de este sistema es el bajo coeficiente de transferencia de calor entre el HTF gaseoso y el material sólido. Por este motivo, es necesario aumentar la superficie del material de almacenamiento sólido, lo cual puede realizarse mediante una estructura de tipo panal de abeja u otras esferas innovadoras.

El sistema de almacenamiento en sí está construido con diversos módulos paralelos, tal como lo muestra la Figura 14, conectados a través de un domo y tubería conectora. El aire caliente ingresa por la parte superior del sistema y fluye a través del material de almacenamiento cerámico.

Para aumentar la flexibilidad operativa, el sistema de almacenamiento está dotado de válvulas de control en su extremo frío (para reducir los esfuerzos del material y los costos). Estas válvulas permiten adaptar la operación de almacenamiento a diferentes cargas parciales mediante el cierre de algunas cámaras. Incluso permiten transferir el calor de una cámara a otra con ayuda de un ventilador adicional.

Un parámetro clave en la fase de diseño del sistema es el autoconsumo eléctrico. La energía necesaria para los ventiladores depende de dos factores principales: el índice de flujo y la caída de presión. Debido a la baja capacidad calorífica del aire, se requiere de un índice de flujo elevado para transferir el calor necesario. La caída de presión del sistema es un elemento clave en el diseño de la estructura de almacenamiento. El desafío es reducir la caída de presión y a la vez incrementar la superficie.

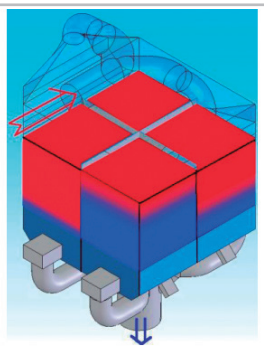


FIGURA 14: DISEÑO DE ALMACENAMIENTO MODULAR (KAM)

Parámetros técnicos

El sistema de almacenamiento en sí opera en un rango de temperaturas entre 120°C–150°C (extremo frío) y 680°C (extremo caliente). En la modalidad de descarga puede alcanzar temperaturas de salida de aproximadamente 640°C–670°C. Dado que la transferencia de calor desde el aire hacia el medio de almacenamiento requiere una gran superficie de calentamiento, el material de almacenamiento (porcelana alúmina) se dispone en estructuras de tipo panal de abeja. En el sistema de Jülich, puede lograrse una superficie de calentamiento de 1180m²/m³. Con una capacidad total de casi 9MWh$_{th}$ y un volumen total del inventario de 120m³ se logra una capacidad de almacenamiento volumétrico de 75kWh$_{th}$/m³ con una masa específica del sistema de alrededor de 13kg/kWh$_{th}$ (Krüger, Hahn, & Zunft, 2011). Se considera que el tamaño máximo de un solo módulo es de alrededor de 250MWhth. Considerando la totalidad del rango térmico (120°C–1100°C) pueden lograrse capacidades de almacenamiento volumétrico específicas de hasta 150kWh$_{th}$/m³.

Las pérdidas de temperatura del sistema se reducen utilizando aislación interna con mantas de fibra cerámica de 0,25m de grosor. Gracias a la aislación interna, no se requieren elementos adicionales para asegurar la estabilidad térmica de la cubierta del sistema de almacenamiento. Se realiza en acero laminado con una temperatura superficial inferior a los 60°C. Las pérdidas de calor del sistema guardan estrecha relación con la configuración del sistema. Se ven afectadas principalmente por las pérdidas de temperatura que ocurren a través del recipiente de almacenamiento y por los efectos de convección en la parte superior del sistema. Según mediciones realizadas en la central piloto de Jülich (Zunft, Hänel, & Krüger, 2011), las pérdidas térmicas responden principalmente al efecto de convección. Si se cierra el sistema mediante válvulas ubicadas en la entrada y la salida, es posible reducir las pérdidas térmicas totales a un mínimo de alrededor del 6% de la capacidad térmica diaria.

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Para transferir el calor del aire al material de almacenamiento se requiere de un gradiente térmico específico entre los dos medios. En la central piloto de Jülich, se considera un gradiente térmico de 15°K. El gradiente térmico afecta la eficiencia térmica del sistema de almacenamiento de calor. En teoría, valores de eficiencia de hasta un 97% pueden alcanzarse. Para lograr una integración útil en sistemas de CSP, se logran valores cercanos al 90% para todos los factores de carga, según KAM.

Similar a lo ocurrido en los tanques Ruth, la aislación térmica de los sistemas permite cimientos simples. Para evitar pérdidas de temperatura y presión, el sistema de almacenamiento térmico se integra a la torre solar mediante conexiones cortas con el receptor y la caldera a vapor. En caso de requerirse mayor espacio para el sistema de almacenamiento, los recipientes pueden ubicarse alrededor de la base de la torre solar. Para módulos como los del sistema de 250MWh$_{th}$ ya mencionado, se calculan cargas de alrededor de 3.000t en los cimientos. Según información proveniente de KAM, la necesaria construcción de un sistema de almacenamiento con capacidad de 4h demora de 3 a 4 meses.

Dado que no hay partes móviles, el sistema requiere de escaso mantenimiento y su disponibilidad es muy elevada. Gracias a que el material de almacenamiento casi no se degrada con el paso del tiempo, el sistema no debiera permanecer fuera de funcionamiento por periodos prolongados. Tal como lo demuestra la experiencia en la central de Jülich y aplicaciones industriales similares, no se necesita mantenimiento adicional que considere la contaminación del panal de abeja.

El sistema de almacenamiento de tipo panal de abeja puede integrarse en forma directa a un sistema de CSP mediante el uso de aire ambiente como fluido de transferencia de calor. Para la operación de carga, el aire caliente del receptor ingresa por la parte superior del sistema de almacenamiento y fluye hacia abajo a través del sistema, tal como se muestra en la Figura 15. El calor se transfiere desde el aire hacia el material de almacenamiento, generando un perfil de temperatura en movimiento en el sistema de almacenamiento.

Al revertir la dirección del flujo se inicia la operación de descarga. El calor es suministrado desde el sistema de almacenamiento al aire y es transferido al generador de vapor.

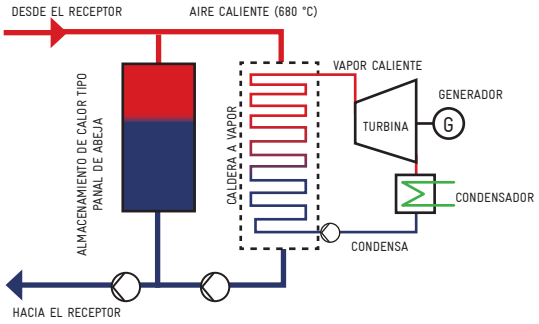


FIGURA 15: ESQUEMA DE SISTEMA DE ALMACENAMIENTO INTEGRADO EN UNA CENTRAL CON RECEPTOR DE AIRE AMBIENTE, SEGÚN (KRÜGER, HAHN Y ZUNFT, 2011)

RESUMEN:

El sistema de almacenamiento de cerámica de tipo panal de abeja es un método de almacenamiento directo, aplicable en sistemas de CSP que utilizan aire ambiente como fluido de transferencia de calor (como la torre solar). La capacidad del sistema está limitada por la disponibilidad de espacio. El sistema prácticamente no necesita mantenimiento. El principal desafío en el diseño del sistema de almacenamiento es la creación de una gran superficie para garantizar una transferencia de calor adecuada desde al aire hacia el material de almacenamiento. La pérdida de presión en el sistema de almacenamiento debe ser limitada para reducir el autoconsumo eléctrico del sistema.
El principio de almacenamiento es común en la industria de procesos y se implementó en 2009 en la central piloto con torre solar de Jülich, Alemania.

TABLA 5: ANTECEDENTES DE ALMACENAMIENTO EN SISTEMAS DE CERÁMICA DE TIPO PANAL DE ABEJA EN CENTRALES DE CSP

NOMBRE DEL PROYECTO	CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO	EN FUNCIONAMIENTO	TECNOLOGÍA DE CSP	CONTRATISTA EPC
Jülich Solar Tower	1,5h ~9MWh$_{th}$	2009	Torre Solar	Kraftanlagen München

2.3.1. Comparación

Los parámetros aquí expresados están explicados en el capítulo 2.1.1. Los diferentes capítulos del presente informe brindan una descripción detallada de cada tecnología.

Existen sistemas de almacenamiento térmico para todas las tecnologías de CSP. Las diferentes tecnologías de almacenamiento son económicamente viables para diferentes capacidades de almacenamiento. Las centrales de CSP no son la única aplicación para las tecnologías consideradas; todos los métodos de almacenamiento también se integran en aplicaciones industriales.

Todos los sistemas de almacenamiento constan de recipientes de almacenamiento y se los aísla del ambiente. Por lo tanto, las complejas condiciones ambientales de Chile (por ej., amplias variaciones de temperatura, elevada radiación UV) deben tenerse en cuenta durante el diseño del sistema, aunque no representan problemas importantes para los equipos. Durante el diseño, también es necesario considerar las elevadas cargas de viento y la mayor exposición al polvo, aunque su impacto en los equipos parece ser bajo.

Con respecto a la integración de sistemas de almacenamiento en procesos de minería existentes, debe tomarse en cuenta la calidad del aire y posibles métodos de integración (filtros, etc.), no sólo durante el diseño sino también durante el funcionamiento del sistema de almacenamiento térmico. Por lo tanto, se debe aprovechar la experiencia obtenida en ambas actividades (minería y sistemas de almacenamiento térmico) ofreciendo un entorno prominente para la investigación y la cooperación para el desarrollo.

La tecnología de almacenamiento térmico para centrales de CSP más madura es el sistema de almacenamiento con sales fundidas de dos tanques instalado en numerosas centrales de CSP de diversos tamaños (de $20MW_{el}$ a $280MW_{el}$) en todo el mundo. Tomando en cuenta las experiencias operativas actuales, el sistema de almacenamiento térmico tiene mayor disponibilidad que el resto de los componentes de la central de CSP. Gracias a la aislación térmica la eficiencia de almacenamiento de todas las tecnologías es muy elevada.

Los desafíos que deberán enfrentar a futuro los sistemas de almacenamiento térmico son la integración de sistemas de almacenamiento con capacidad mayor a 8h en sistemas de generación directa de calor y la reducción de costos del sistema en su conjunto. Es por ello que las actuales tecnologías continúan en desarrollo y se investigan nuevos conceptos de almacenamiento.

TABLA 6: COMPARACIÓN DE LAS DIFERENTES TECNOLOGÍAS DE ALMACENAMIENTO

PARÁMETRO	TECNOLOGÍA		
	SISTEMA CON SALES FUNDIDAS	TANQUES RUTH	ALMACENAMIENTO DE CERÁMICA TIPO PANAL DE ABEJAS
	CAPÍTULO 2.3.1	CAPÍTULO 2.3.2	CAPÍTULO 2.3.3
En el funcionamiento de centrales de CSP	Desde 2007	Desde 1917	Desde 2007
Método	indirecto/directo	directo	directo
Típico tamaño del sistema de almacenamiento	4,8 y 16h	0,5h - 1h	1,5 – 4h
Capacidad de almacenamiento	Alta	Baja	Media
Densidad energética	~75kWh/m³ (indirecto) ~200kWh/m³ (directo)	30-45kWh/m³	70-80kWh/m³ (680°C) 140kWh/m³ (1100°C)
Autoconsumo	Alto	Bajo	Bajo
Modularidad	Baja	Alta	Media
Rango térmico	Hasta 550°C	Hasta 285°C	Hasta 680°C (1100°C)
Cimientos	Complejos	Básicos	Básicos
OyM	Medio	Bajo	Bajo
Trayectoria en CSP	Muy amplia	Amplia	Una central
Tecnología principal	Centrales con colectores cilíndrico parabólicos y torre solar que utilizan aceite térmico y sales fundidas como HTF	Centrales con tecnología lineal Fresnel y torre solar con generación directa de vapor	Centrales con torre solar y receptores de aire ambiente
Puntos clave	• Único sistema de almacenamiento a largo plazo disponible • Extensa trayectoria y experiencia operativa • Los cimientos son una parte clave • Alta disponibilidad, OyM medio	• Único método de almacenamiento directo para generación directa de vapor • Solución de almacenamiento de corto plazo • Alta modularidad	• Aplicable para integración directa en sistemas de aire e integración indirecta con intercambiadores de calor • El calor se almacena en material sólido • Casi no se necesita mantenimiento, incluso luego de interrupciones prolongadas

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

3. Desafíos y oportunidades

Contar con información confiable sobre los costos relativos del sistema de almacenamiento térmico de la central de CSP es un punto importante al evaluar cada tecnología. En este capítulo se calculan los costos de los sistemas de almacenamiento presentados, con énfasis en el sistema con sales fundidas.

El sistema de almacenamiento térmico de una central de CSP de escala comercial representa entre el 10%–18% del total de los costos del sistema de la central y depende en gran medida de la tecnología utilizada y del tamaño del sistema. Sin embargo, el sistema de almacenamiento le permite a la central aumentar su factor de capacidad considerablemente. Con este excedente en su producción, el sistema de almacenamiento siempre reduce los costos específicos de generación energética en un rango adecuado, es decir, los "costos nivelados de la electricidad".

En este capítulo se calculan los costos de inversión de las tecnologías de punta ya descritas y, en segundo lugar, se analizan los costos de operación y mantenimiento del sistema de almacenamiento con sales fundidas.

3.1. COSTOS DE INVERSIÓN (INVERSIONES DE CAPITAL)

En una primera etapa, se calculan los costos de inversión necesarios para los equipos del sistema de almacenamiento. Se realiza un cálculo general para las tres tecnologías de punta consideradas y, dado que el sistema con sales fundidas es la tecnología más madura, se presenta un desglose detallado de los costos de esta tecnología.

La reducción de costos de las centrales de ESC es un punto clave en el actual desarrollo de este tipo de centrales en todo el mundo. Además de mejorar la eficiencia de la central, un objetivo importante en el desarrollo de dichas centrales es reducir los costos específicos de inversión. En general, se asume que un incremento en la capacidad de la central llevará a una reducción en los costos específicos de la central de CSP en su conjunto. Esta "economía de escala" es evidente, en especial respecto del bloque de potencia. Dado que los componentes principales no varían, duplicar la capacidad instalada no implicaría duplicar los costos de inversión.

Dado que la economía de escala es un factor importante para el desarrollo de las centrales de CSP, el siguiente capítulo también la analiza en profundidad para el sistema de almacenamiento térmico.

3.1.1. Costos totales de instalación

Diversos estudios de investigación analizan los costos de inversión de los sistemas de almacenamiento. Entre dichos estudios, existen experiencias de otros proyectos e indicaciones relacionadas con empresas EPC[3]. Teniendo en cuenta los costos totales del sistema de CSP, los costos del sistema de almacenamiento térmico no dependen de forma directa del lugar de emplazamiento de la central.

Para presentar un panorama general de los costos de inversión totales, los diferentes sistemas modernos son analizados considerando su típico tamaño de aplicación, según se expone en la Tabla 7. En caso de información extraída de fuentes públicas, se indica la fuente utilizada. Se informan los costos estimados específicos de almacenamiento para permitir una comparación entre las cifras. Todos los datos corresponden a centrales desarrolladas/construidas entre 2010 y 2013.

El cálculo de costos del sistema de almacenamiento toma en cuenta todos los equipos que integran el sistema, tal como fueron descritos en el capítulo 2.3. En resumen, incluye todos los equipos para la transferencia de calor (si es necesario), material de almacenamiento, recipientes de almacenamiento y bombas o ventiladores, así como el riesgo y las ganancias asociadas al EPC. Sólo considera el sistema de almacenamiento en sí, sin incluir un campo solar adicional ("múltiplo solar") para carga, con el fin de posibilitar una comparación entre las cifras sin incidencia por parte de la tecnología del campo solar utilizada. El análisis tampoco toma en cuenta los costos y la preparación del lugar de emplazamiento.

3.1.2. Detalle de costos de un sistema indirecto con sales fundidas

Dado que el sistema con sales fundidas es el único comercialmente disponible para grandes capacidades de almacenamiento, este capítulo analiza en detalle su estructura de costos. Como base para elaborar el detalle de costos presentado en la Figura 16, se tomó una central con colectores cilíndrico parabólicos con una capacidad instalada de 100MW$_{el}$ y una capacidad de almacenamiento de 8h, lo cual da como resultado una capacidad de almacenamiento de calor de 2200MWh$_{th}$. El sistema tomado como referencia consta de dos líneas con un sistema común de 2 tanques. Los datos corresponden a una central de CSP real situada en Estados Unidos desarrollada por una compañía de EPC con experiencia en la industria.

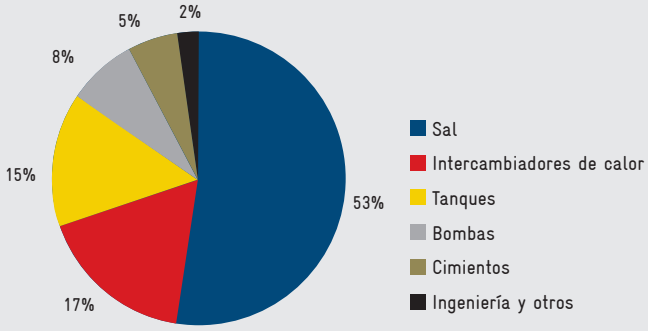


FIGURA 16: DETALLE DE COSTOS DE UN SISTEMA INDIRECTO CON SALES FUNDIDAS DE 2200MWh$_{th}$

TABLA 7: COSTOS TOTALES DE INSTALACIÓN

SISTEMA DE ALMACENAMIENTO	CONDICIONES LÍMITE[4]			COSTOS ESTIMADOS DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO (EUR/KWHTH)	FUENTE
	TAMAÑO DE ALMACENAMIENTO (H)	TAMAÑO DEL SISTEMA (MWEL)	CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO (MWHTH)		
Tanques Ruth	0.5	50	114	65-70	Central de CSP Lineal Fresnel en la región del Medio Oriente y África
Cerámica tipo panal de abeja	--	--	2	~60	Información suministrada por KAM (central de CSP con torre solar)
Cerámica tipo panal de abeja	--	--	250	~30	
Sales fundidas (directo)	6	100	1560	30-36	(Kolb, Ho, Mancini, & Gary, 2011)
Sales fundidas (indirecto)	7.5	50	1010	41-45	(IRENA, 2012)
Sales fundidas (indirecto)	8	100	2200	~40	Central de CSP colectores cilíndrico parabólicos en EE.UU.
Sales fundidas (indirecto)	14	100	~3800	42-45	(Kulichenko & Wirth, 2011)

3 Engineering, procurement, and construction
4 El capítulo 5 incluye las definiciones de estas condiciones límite

Con más del 50%, la sal solar y los componentes relacionados representan la mayor parte de los costos del sistema.

Para tener una idea más precisa de dicho porcentaje, la Figura 17 presenta un detalle de los componentes principales de los costos de la sal solar.

Con un porcentaje superior al 80%, la sal solar concentra el mayor porcentaje del costo; con un costo específico de alrededor de 750EUR/t. Dado que la sal solar es un componente material, el hecho de ordenar una cantidad mayor no supone una reducción de costos. Por lo tanto, el efecto de la "economía de escala" es casi nulo o incluso negativo para la sal solar. Además de los sistemas de almacenamiento térmico, otras aplicaciones industriales requieren de los dos componentes de la sal solar, es decir, nitrato de sodio ($NaNO_3$) y nitrato de potasio (KNO_3).

El segundo mayor porcentaje de los costos de inversión es la fundición inicial de la sal. Dado que la sal se entrega como material sólido, es necesario precalentarla y fundirla en la central, lo cual requiere de un tratamiento de trituración, precalentamiento y fundición y de la correspondiente cantidad de gas (y otros combustibles). Considerando que el costo del gas es de 35 EUR/MWh (costo actual en España, (Statistisches Bundesamt, Alemania, 2013)) los costos específicos de fundición son cercanos a los 115EUR/t.

Los tanques de almacenamiento (15%) y los cimientos (5%) concentran en forma conjunta el segundo mayor porcentaje de costos del sistema. Dado que el tamaño de los tanques de almacenamiento está limitado, para aumentar la capacidad del sistema se requiere de sistemas de tanques adicionales. Si se instalan varios sistemas de 2 tanques en un lado, la infraestructura de construcción puede aprovecharse varias veces, lo que genera un efecto de economía de escala, aunque limitado.

Las posibilidades de reducción de costos para el sistema incluyen desde luego la reducción de costos asociados a los tanques, que también inciden en los costos de los cimientos. Un concepto prometedor es el sistema thermocline de 1 tanque, descrito en el capítulo 5.1.1. La incidencia del sistema thermocline en los costos totales del sistema no es fácil de determinar por el momento, debido a que es necesario tomar en cuenta diversos componentes nuevos (como la barrera móvil) y factores de carga.

Dado que la cantidad de sal necesaria depende de la diferencia térmica útil, un aumento en dicho rango de temperatura permite ahorrar sal fundida. Teniendo en cuenta que la sal fundida concentra el mayor porcentaje de costos del sistema, esto permite una importante reducción de costos. Por esta razón, se está trabajando en diversos avances considerando por un lado la optimización de la mezcla de sales fundidas (ver capítulo 5.1.1) y por otro la integración de receptores directos de sales fundidas en centrales con colectores cilíndrico parabólicos y lineales Fresnel.

RESUMEN:

El sistema de almacenamiento térmico representa entre el 10% y 18% de los costos totales de inversión de la central de CSP. Los costos de almacenamiento específicos del sistema de tanques Ruth son los más elevados, seguidos por los costos del sistema de almacenamiento cerámico de tipo panales de abeja.

Diversos estudios han analizado en detalle los costos de inversión del sistema con sales fundidas. Debido a su mayor rango térmico, los sistemas directos con sales fundidas ofrecen una ventaja en términos de costos comparados con los sistemas indirectos con sales fundidas.

Los costos del sistema con sales fundidas están determinados mayoritariamente por los costos de la sal solar, seguidos de los costos de los tanques y de los cimientos.

Otros sistemas en desarrollo (como el sistema de 1 tanque u otros desarrollos de materiales) tienen potencial de reducción de costos.

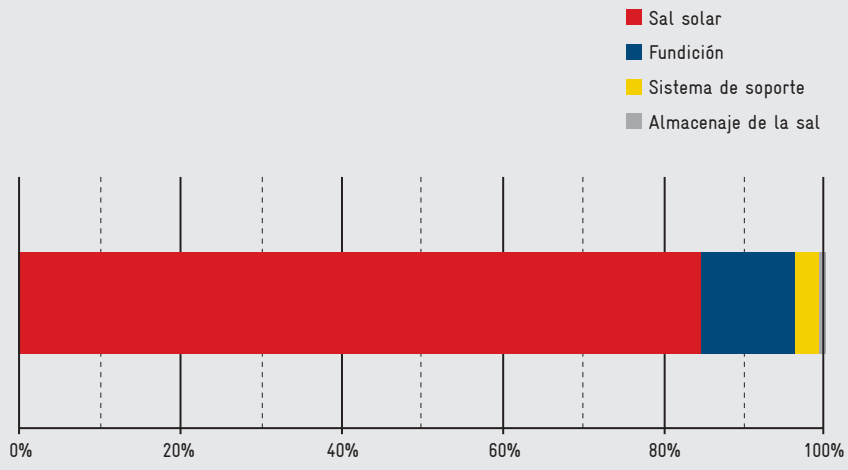


FIGURA 17: DETALLE DE COSTOS DE LA SAL SOLAR

3.2. COSTOS OPERATIVOS (COSTOS DE OYM)

En general, los costos de OyM (Operación y Mantenimiento) de una central de CSP siempre se informan para el sistema en su conjunto, incluyendo los costos de OyM del sistema de almacenamiento térmico. Para lograr un cálculo estimado de los costos de OyM específicos del sistema de almacenamiento térmico, se aplica un método que va desde lo más general a lo más particular, considerando los costos totales de OyM de la central y los porcentajes correspondientes del sistema de almacenamiento térmico.

Según (IRENA, 2012), los costos totales de OyM de una central de CSP con colectores cilíndrico parabólicos en Estados Unidos oscilan entre 20USD/MWh_{el} y 30USD/MWh_{el}. En el mismo estudio, los costos de OyM para una central comparable situada en Sudáfrica oscilan entre 30 USDMWh_{el} y 40USD/MWh_{el}.

En principio, los costos de OyM están determinados por dos factores principales:

- Los costos fijos de OyM, que representan alrededor del 90% de los costos totales de OyM, incluyen los costos de personal y costos fijos de insumos de repuesto y reemplazo por desgaste, así como los costos de seguros.
- Los costos variables de OyM, que representan el 10% de los costos totales de OyM, están dominados por diversos insumos, como el autoconsumo de las bombas para las sales fundidas, los ventiladores o la cinta calefactora adicional de la tubería y de los tanques.

El próximo capítulo presenta en detalle los costos de OyM de un sistema con sales fundidas. Dado que existe escaso historial de sistemas de cerámica tipo panal de abeja, no es posible calcular los costos. Los costos de OyM de los sistemas de tanques Ruth son insignificantes y pueden incluirse en los costos de OyM del bloque de potencia dados sus componentes similares (recipientes presurizados).

Basándose en Turchi, Parabolic trough reference plant for cost modeling with the solar advisor model, 2010, la Figura 18 presenta un detalle de costos de mantenimiento y reparación de un sistema con sales fundidas de 100MW_{el} y 7h. Esta central de CSP es comparable a la estudiada en el capítulo 3.1.1 en términos de la tecnología utilizada, costos de inversión y el lugar de emplazamiento. El sistema de almacenamiento térmico es un poco más pequeño (7h en lugar de 8h) pero también incluye dos líneas con un sistema común de 2 tanques. El sistema de almacenamiento térmico representa alrededor del 10% de los costos totales de mantenimiento y reparación.

Para calcular los costos totales de OyM de un sistema de almacenamiento térmico, se consideran los siguientes supuestos básicos.

- Costos de Mantenimiento y Reparación expuestos en la Figura 18.
- El 20% del personal que trabaja en la central se dedica a la operación del sistema de almacenamiento térmico.
- El 35% de los costos variables se destinan a la operación de cintas calefactoras electricas y las bombas.
- Tomando como referencia la proporción de los costos totales de inversión que corresponden al sistema de almacenamiento térmico, se considera el 15% de los otros costos.
- Central de CSP (según (Turchi, Parabolic trough reference plant for cost modeling with the solar advisor model, 2010)): 100MW_{el}, sistema con colectores cilíndrico parabólicos, sistema de almacenamiento con sales fundidas de 7h (2000MWh_{th}), producción anual neta de 425 GWh_{el}, operada en EE.UU.

Considerando los supuestos anteriores, el costo de OyM del sistema de almacenamiento térmico se calcula en alrededor del 18% de los costos totales de OyM (1,9 millones USD), o un valor específico de 4,5 USD/MWh_{el}.

Para trasladar dichos valores a Chile, es necesario considerar algunos supuestos adicionales. Por un lado, los salarios en Chile son significativamente inferiores a los de EE.UU. Comparado con el personal operativo necesario para todo el sistema de CSP, la operación del sistema de almacenamiento térmico requiere de personal con mayor capacitación, como técnicos e ingenieros. Según el estudio (CIO Wealth Management Research, 2012), los salarios de los ingenieros en Santiago (Chile) representan 1/3 de los salarios que se pagan en Los Ángeles (EE.UU.) y son similares a los de Sao Paulo (Brasil). Por otra parte, los precios del suministro energético son superiores a los de otros países en la región, lo que origina un leve aumento del 20% en los costos variables.

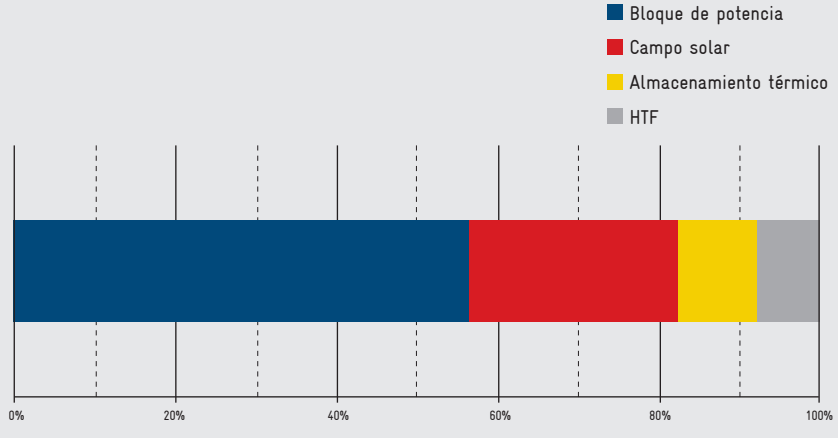


FIGURA 18: DETALLE DE COSTOS DE MANTENIMIENTO Y REPARACIÓN DE UNA CENTRAL DE ESC

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Para lograr una visión independiente, nuevamente se han considerado algunos supuestos:

- Comparado con Estados Unidos, los salarios en Chile corresponde a un 1/3.
- Debido a la falta de experiencia operativa en centrales de CSP durante los primeros años, se requiere de un 50% más de personal de OyM y se considera la necesidad de contratar personal externo adicional para brindar capacitación práctica.
- Los costos variables son 20% superiores a los de EE.UU.
- Los costos de los insumos de repuesto son 50% superiores debidos a la falta de industria local para la fabricación de equipos específicos (bombas para sales fundidas e intercambiadores de calor).

Teniendo en cuenta los supuestos anteriores, se calcula que los costos de OyM del sistema de almacenamiento térmico son aproximadamente 8-10% inferiores. El efecto de los salarios inferiores se compensa por un lado con los mayores costos variables y por el otro con la falta inicial de experiencia. Independientemente de las incertidumbres asociadas a los supuestos anteriores, puede concluirse que los costos de OyM del sistema de almacenamiento térmico no sufren alteraciones significativas en el corto plazo. Desde luego, las primeras centrales tienen costos de OyM mayores, derivados de los mayores riesgos iniciales. Considerando que existe una industria de CSP consolidada y capacitación sostenible del personal local, es posible reducir el personal necesario, lo cual permite lograr menores costos de OyM del sistema de almacenamiento en el mediano plazo debido que en Chile los salarios son más bajos.

RESUMEN:

Los costos de OyM del sistema de almacenamiento térmico solo se pueden calcular teniendo en cuenta una serie de supuestos, dado que en general suelen informarse los costos de OyM para toda la central de CSP. Debido a que los costos de OyM de los sistemas con tanques Ruth son despreciables y los del sistema cerámico tipo panal de abeja no pueden calcularse debido a la escasa experiencia en este tipo de sistemas, solamente se informan los costos de OyM de sistemas con sales fundidas.
Teniendo en cuenta diversos supuestos, los costos de OyM de los sistemas de almacenamiento térmico con sales fundidas representan alrededor del 18% de los costos totales de OyM o un valor específico de 4,5 USD/MWh$_{el}$.

3.3. CONTENIDO LOCAL ESTIMADO

Un factor clave para el desarrollo de las centrales de CSP es el uso de equipos que puedan fabricarse fácilmente dentro de los sectores industriales existentes. Este "contenido local" depende desde luego de diversos factores:

- Disponibilidad de materias primas a precios competitivos.
- Complejidad y niveles de calidad del componente de CSP.
- Conocimiento y capacidad industrial local.
- Inversión de las compañías locales en nuevas tecnologías.

Este capítulo presenta una primera estimación del potencial de contenido local del sistema de almacenamiento térmico con sales fundidas en Chile. Para realizar dicho análisis, se calcula el porcentaje de los costos de inversión totales correspondientes a fabricación local.

Tomando como referencia el detalle de costos presentado en el capítulo anterior, la Figura 19 presenta un esquema de la cadena de valor del sistema de almacenamiento térmico con sales fundidas. En particular, los intercambiadores de calor y las bombas para sales fundidas requieren de equipos y líneas de ensamblaje especializados.

Dado que Chile es un importador neto de acero (US Geological Survey, 2012) y el sector de ingeniería mecánica ofrece capacidades limitadas, se considera que el potencial de fabricación local de componentes especiales es muy bajo (Ellermann, 2012). No obstante, hay capacidad para realizar actividades de construcción relacionadas con el ensamblaje del sistema en el lugar de emplazamiento de la central.

- En países con amplia trayectoria relacionada con centrales de CSP y una industria consolidada (como en el caso de España), la sal solar es el único componente que no puede fabricarse localmente debido a la ausencia de materia prima. Dado que Chile ofrece esta materia prima, el componente de sal solar podría ser uno de los primeros en fabricarse localmente.

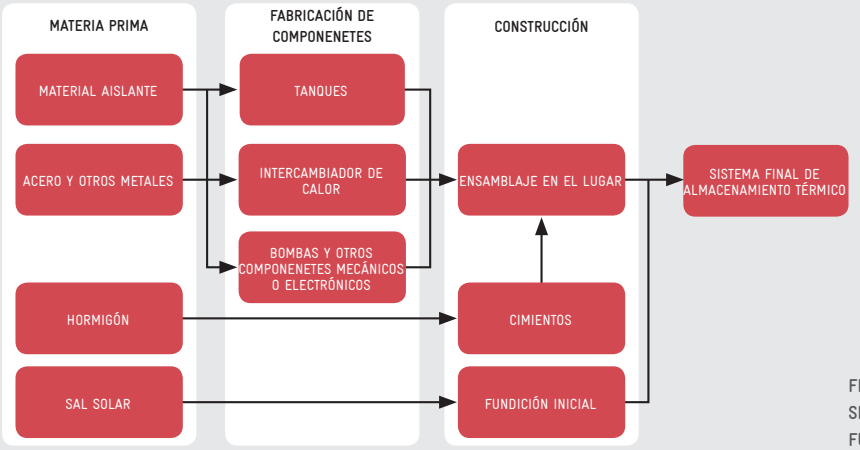


FIGURA 19: ESQUEMA DE LA CADENA DE VALOR DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON SALES FUNDIDAS

Tomando en cuenta la experiencia de otros estudios y la información pública sobre el sector industrial de Chile, el potencial de contenido local puede dividirse en tres etapas diferentes.

- **Posibilidades a corto plazo:** Abarcan los eslabones de la cadena de valor que no requieren adaptaciones de los procesos industriales existentes. La sal solar, partes de los tanques y las partes principales de los cimientos están incluidas en esta categoría.
- **Posibilidades a mediano plazo:** Abarcan los eslabones de la cadena de valor que pueden fabricarse en Chile mediante adaptaciones a las instalaciones industriales existentes y un aumento de la capacidad industrial de Chile. Estas posibilidades a mediano plazo se logran mediante un crecimiento de la industria de CSP. Las partes restantes de los tanques, los trabajos de ingeniería y el ensamblaje de los intercambiadores de calor están incluidos en esta categoría.
- **Posibilidades a largo plazo:** Abarcan los eslabones de la cadena de valor que implican un gran esfuerzo para que la producción sea local. Requieren de nuevas instalaciones y trabajadores altamente especializados. Estos componentes requieren de un mercado con alta demanda. El valor principal de los intercambiadores de calor, todos los equipos especializados (bombas para sales fundidas) y la supervisión del ensamblaje en el lugar están incluidos en esta categoría.

La Figura 20 presenta una estimación general del contenido local dividido según las categorías anteriores. Para el corto plazo se estima un valor del 65% y un 13% para las posibilidades a mediano plazo.

Debido a la disponibilidad local de la sal fundida, un porcentaje muy alto del valor del sistema corresponde a componentes que pueden fabricarse en Chile (más del 60% del valor total). Considerando la limitada capacidad industrial, las posibilidades a mediano plazo son restringidas. No obstante, las posibilidades a mediano plazo totales representan casi el 80% del sistema de almacenamiento térmico con sales fundidas.

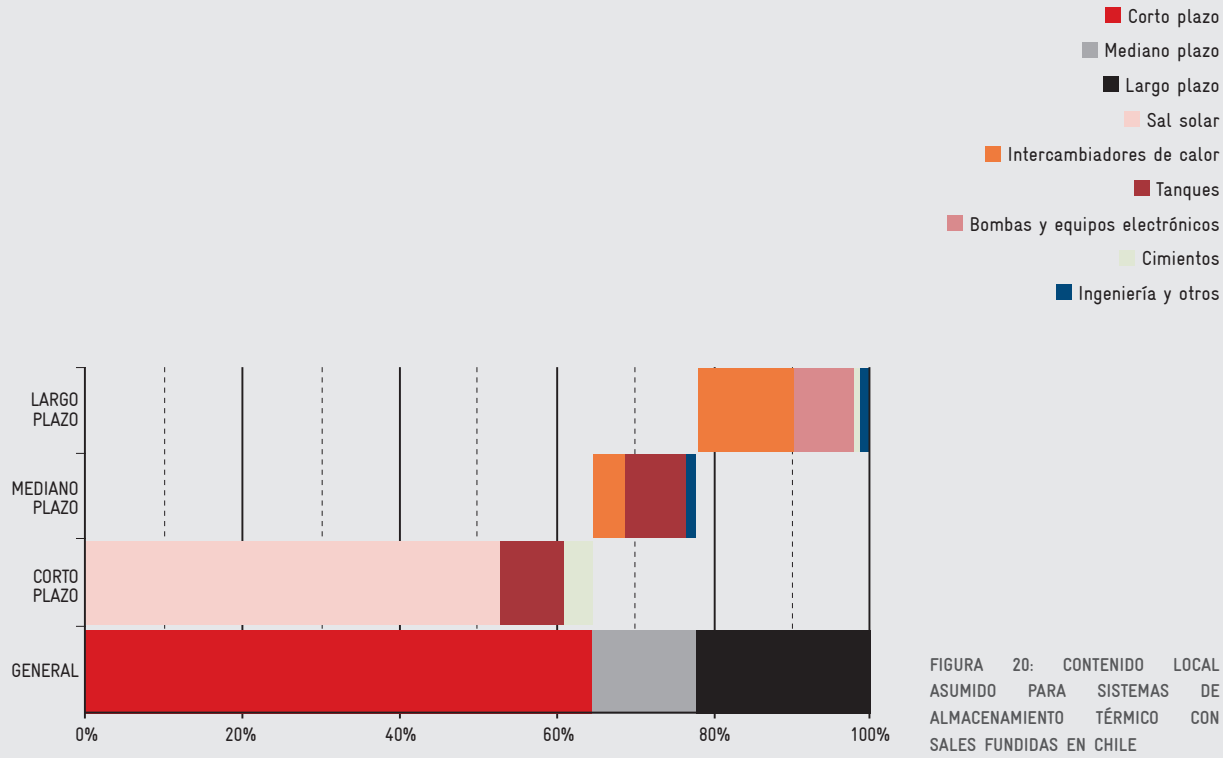


FIGURA 20: CONTENIDO LOCAL ASUMIDO PARA SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON SALES FUNDIDAS EN CHILE

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

4. Participantes del mercado a nivel mundial

Este capítulo presenta algunos de los principales participantes del mercado a nivel mundial activos en el campo del almacenamiento de energía térmica.

A fin de uniformizar los datos, todos los valores de ventas están expresados en USD o EUR. Para los casos en que los informes anuales de la compañía se expresan en otra moneda, los valores de ventas se calcularon tomando una tasa de cambio fija.

4.1. MATERIAL DE ALMACENAMIENTO

TABLA 8: RESUMEN DE LAS COMPAÑÍAS FABRICANTES DEL MATERIAL DE ALMACENAMIENTO PRESENTES EN EL MERCADO

NOMBRE DE LA COMPAÑÍA	PAÍS DE ORIGEN	PRESENCIA EN CHILE
SQM	Chile	√
BASF	Alemania	√
FOMA	China	×
Saint-Gobain NorPro	EE.UU./Alemania	(√)

4.1.1. SQM

SQM es el mayor productor mundial de químicos derivados del litio, yodo, nitrato de potasio y nitratos industriales utilizados para el almacenamiento de energía térmica. SQM tiene su casa matriz en Chile, donde también se sitúan la mayoría de las minas.

La compañía es líder del mercado de nitrato de sodio industrial (60% de participación) y nitrato de potasio (40% de participación), dos de los componentes de la denominada "sal solar". SQM produce "sal solar" desde 2008. El volumen de ventas del sector ("nitratos industriales") aumentó en un 50% de 2011 a 2012 y se espera un nuevo aumento en 2014.

TABLA 9: INFORMACIÓN CLAVE SOBRE SQM (CON BASE EN LOS INFORMES ANUALES DE LA COMPAÑÍA 2008-2012)

AÑO	EMPLEADOS (TOTAL)	EMPLEADOS (CSP)	VENTAS (TOTAL) MILLONES DE USD	VENTAS (RELACIONADAS CON EL SECTOR DE CSP) MILLONES DE USD
2012	5643	S/d	2.429	277
2011	4902	S/d	2.145	182
2010	4327	S/d	1.830	198
2009	4387	S/d	1.439	--
2008	4561	S/d	1.744	--

Trayectoria en la industria de CSP

SQM es el líder del mercado como proveedor de sistemas de almacenamiento con sales fundidas. Desde 2009, SQM proveyó de sal solar a aproximadamente 3 centrales de CSP con 50MW$_{el}$ por año (en total más de 750MW$_{el}$).

Algunos de los proyectos en Europa son Andasol 1 y 2 (Armería, España, 2008-2009), Extressol 1, 2 y 3 (Extremadura, España, 2009-2011) o L'Africana (Andalucía, España, 2012). Fuera de Europa, SQM proveyó de sal al proyecto de CSP más grande de EE.UU. (2012) y ya firmó un contrato para proveer sal solar a una central de 100MW$_{el}$ ubicada en Sudáfrica durante 2014.

4.1.2. BASF

BASF es una compañía química con presencia mundial, activa en los principales sectores químico y petroquímico, biotecnología, soluciones agrícolas y materiales funcionales. La compañía provee de productos a las principales industrias. BASF tiene su casa matriz en Ludwigshafen (Alemania) y es considerada la mayorcompañía química del mundo.

BASF tiene experiencia de más de 40 años en el uso de sal fundida como HTF en procesos químicos. La compañía también fabrica nitratos y nitritos alcalinos de alta pureza. En los últimos años, BASF ha realizado un trabajo intenso de investigación y desarrollo en el campo de HTF de alta temperatura y materiales de almacenamiento térmico, en especial con respecto a la estabilidad a largo plazo de la sal fundida y los efectos corrosivos de los materiales expuestos a temperaturas elevadas.

TABLA 10: INFORMACIÓN CLAVE SOBRE BASF (CON BASE EN LOS INFORMES ANUALES DE LA COMPAÑÍA 2008-2012)

AÑO	EMPLEADOS (TOTAL)	EMPLEADOS (CSP)	VENTAS (TOTAL) MILLONES DE EUR	VENTAS (DIVISIÓN AMÉRICA DEL SUR) MILLONES DE EUR
2012	110.782	S/d	72.129	4.549
2011	111.141	S/d	73.497	4.418
2010	109.140	S/d	63.873	3.829
2009	104.779	S/d	50.693	3.001
2008	96.924	S/d	62.304	4.359

BASF es una sociedad anónima

BASF Chile S.A., la subsidiaria chilena de la compañía alemana BASF, tiene su sede social en Santiago de Chile. La sede regional para América del Sur se encuentra en Sao Paulo (Brasil) y tiene un centro de investigación importante en Guaratinguetá (Brasil).

Trayectoria en CSP

BASF tiene una amplia trayectoria en Investigación y Desarrollo relacionados con el estudio del comportamiento corrosivo de las sales fundidas y la caracterización de la sal.

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

4.1.3. China FOMA Group

La compañía de origen chino FOMA, con sede en Beijing, es una de las 50 principales fabricantes de maquinaria en China. La compañía se desempeña en los sectores de producción de equipos para energía y forestación, ingeniería y comercio.

FOMA exporta sus productos a más de 130 países y regiones de todo el mundo, incluyendo EE.UU., Alemania y Japón. Desde hace 20 años la compañía provee nitrato de potasio y sodio (los elementos clave de la sal solar) para procesos caloríficos industriales y aplicaciones de almacenamiento industriales.

TABLA 11: INFORMACIÓN CLAVE SOBRE CHINA FOMA GROUP (CON BASE EN UNA ENTREVISTA REALIZADA A REPRESENTANTES DE LA COMPAÑÍA)

AÑO	EMPLEADOS (TOTAL)	VENTAS (TOTAL) MILLONES DE EUR
2012	4.500	600
2011	S/d	680
2010	S/d	650

China FOMA es una subsidiaria de China National Machinery Industry Corporation y es una compañía estatal. German-Tech es su distribuidor exclusivo para exportaciones fuera de China.

Trayectoria en CSP

China FOMA tiene amplia experiencia como proveedor de procesos industriales. Su capacidad de suministro de sal solar es de alrededor de 80.000 toneladas por año.

4.1.4. Saint-Gobain NorPro

Saint-Gobain se fundó hace más de 300 años, con sede en Francia y se ha convertido en una corporación industrial internacional. La compañía brinda soluciones en cinco sectores comerciales principales: vidrio plano, embalaje, productos para la construcción, distribución y materiales de alto rendimiento (en este sector Saint-Gobain NorPro actúa a través de representantes).

Saint-Gobain NorPro, con sede en Estados Unidos y Alemania, cuenta con amplios conocimientos y experiencia en el desarrollo de estructuras de cerámica y materiales de alto rendimiento para optimizar las propiedades de transferencia de calor y la disminución de la presión de los sistemas. La compañía brinda soluciones mediante el uso de cerámica en aplicaciones industriales y ofrece una amplia gama de diversas estructuras y materiales.

TABLA 12: INFORMACIÓN CLAVE SOBRE SAINT-GOBAIN (CON BASE EN LOS INFORMES ANUALES DE LA COMPAÑÍA 2008-2012)

AÑO	EMPLEADOS (TOTAL)	VENTAS (TOTAL) MILLONES DE EUR	EMPLEADOS (SECTOR DE MATERIALES DE ALTO RENDIMIENTO)	VENTAS (SECTOR DE MATERIALES DE ALTO RENDIMIENTO) MILLONES DE EUR
2012	192.781	43.198	~27.000	4.376
2011	194.658	42.116	~27.000	4.163
2010	189.193	40.119	~27.600	-
2009	191.442	37.786	-	-
2008	209.175	43.800	-	-

Saint-Gobain es una sociedad anónima cuyos principales accionistas son inversores institucionales internacionales (42%) y franceses (18%).

Saint-Gobain tiene una delegación general en Chile y su presencia en este país está marcada por la actividad desarrollada por Verallia en el mercado de las botellas de vidrio para el mercado del vino. Su historial en Chile se inició en 2005 con la entonces BO Glass S.A./Envases.

Trayectoria en CSP

Saint-Gobain NorPro es una compañía con amplia experiencia como proveedor de cerámica para oxidadores térmicos regenerativos. También ofrece sus productos al mercado de CSP, brindando soluciones para aplicaciones de lecho fijo y móvil.

4.2. INTERCAMBIADORES DE CALOR

TABLA 13: RESUMEN DE LAS COMPAÑÍAS PRESENTES EN EL MERCADO DE INTERCAMBIADORES DE CALOR

NOMBRE DE LA COMPAÑÍA	PAÍS DE ORIGEN	PRESENCIA EN CHILE
Alfa Laval	Suecia	✓
Babcock Power	EE.UU.	×
Struthers Wells (subsidiary)	EE.UU.	×
SPX	EE.UU.	(✓)
GEA Heat Exchangers	Alemania	×
Bertams Heatec	Suiza	✓

4.2.1. Alfa Laval

Alfa Laval fue fundada en 1883 en Estocolmo, Suecia. La compañía es productora de intercambiadores de calor, separadores, bombas y válvulas para la industria química y petroquímica, centrales de energía y la industria alimenticia. Los productos de transferencia de calor representan más del 54% de sus ventas y su participación en dicho mercado es superior al 30%.

Con respecto a las centrales de CSP y a los sistemas de almacenamiento térmico, Alfa Laval suministra intercambiadores de calor para la transferencia de calor entre el aceite térmico del campo solar y el sistema con sal fundida. La compañía también produce otros tipos de intercambiadores de calor, condensadores y aerorefrigeradores para centrales de CSP. El sector de CSP es parte de la división de tecnología de procesos.

TABLA 14: INFORMACIÓN CLAVE SOBRE ALFA LAVAL (CON BASE EN LOS INFORMES ANUALES DE LA COMPAÑÍA 2008-2012, TIPO DE CAMBIO: 1 EUR/0,11 SEK)

AÑO	EMPLEADOS (TOTAL)	VENTAS (TOTAL) MILLONES DE EUR	VENTAS (DIVISIÓN TECNOLOGÍA DE PROCESOS, SECTOR RELACIONADO CON CSP) MILLONES DE EUR
2012	16.419	3.337	1.409
2011	16.064	3.153	1.337
2010	12.618	2.625	1.168
2009	11.390	2.369	1.279
2008	12.119	3.021	1.371

Alfa Laval es una sociedad anónima cuyo principal accionista es Tetra Laval (26,1%).

La compañía tiene sus oficinas en la comuna de Las Condes, Santiago.

Trayectoria en CSP

En 2013 Alfa Laval suministró los intercambiadores de calor sal fundida / HTF para las centrales de CSP construidas por Abengoa Solar en Sudáfrica (Kaxu-Upington) y EE.UU. (Solana).

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

4.2.2. Babcock Power

Babcock Power Inc. es una compañía de multiproducto privada global, de energía y servicios ambientales. Babcock es uno de los productores líderes mundiales de tecnología, equipos y servicios para la industria de la generación de energía. A través de sus subsidiarias, la compañía diseña y fabrica intercambiadores de calor, generadores de vapor para recuperación de calor, condensadores de superficie y calentadores de agua de alimentación para centrales nucleares y con combustible fósil.

Para las centrales de CSP, su subsidiaria Struthers Wells (parte de la división de Ingeniería Térmica) diseña y fabrica sistemas generadores de vapor de alta presión, receptores centrales y calentadores de agua de alimentación. Con respecto a los sistemas de almacenamiento térmico solar, Struthers Well fabrica intercambiadores de calor con sales fundidas para la transferencia de calor directa desde las sales fundidas al bloque de potencia. También fabrica intercambiadores de calor para transferencia de calor entre el aceite térmico y las sales fundidas.

Información clave

No hay información disponible sobre la compañía.

Trayectoria en CSP

En 1982 Struthers Wells diseñó y fabrico un generador de vapor solar completo en Bakersfield, California. En 1994 fabricó el intercambiador de calor con sal fundida para la torre de energía Solar Two, el primer sistema de CSP de almacenamiento directo con sal fundida.

Desde 2011 Struthers Well equipó diversas centrales en España y el Medio Oriente con generadores de vapor y calentadores de HTF.

4.2.3. SPX

SPX, con casa matriz en Charlotte, Estados Unidos, es un fabricante multi-industrial que se desempeña en los sectores de energía, alimentos y bebidas e industria. SPX Thermal Equipment & Service es uno de los fabricantes líderes mundiales de componentes para centrales térmicas. A nivel mundial, SPX desarrolla y produce soluciones para todo tipo de centrales térmicas. Con diversas subsidiarias como "Balcke-Dürr", la compañía ofrece componentes para centrales de energía en los ciclos de agua-vapor, calor-fluido de transferencia o sales fundidas.

Para las centrales de CSP y los sistemas de almacenamiento térmico, SPX produce intercambiadores de calor para transferencia directa de calor desde el sistema con sales fundidas al ciclo de agua-vapor del bloque de potencia. La compañía también genera soluciones para la transferencia de calor desde el ciclo del aceite térmico al ciclo del sistema de almacenamiento con sales fundidas. SPX también brinda soluciones de enfriamiento y componentes para el generador de vapor y el bloque de potencia de las centrales de CSP.

TABLA 15: INFORMACIÓN CLAVE SOBRE SPX (CON BASE EN LOS ESTADOS CONTABLES DE LA COMPAÑÍA 2009-2012)

AÑO	EMPLEADOS (SPX, TOTAL)	VENTAS (SPX, TOTAL) MILLONES DE USD	VENTAS (SPX, SECTOR DE ENERGÍA) PARTICIPACIÓN EN LAS VENTAS TOTALES	EMPLEADOS (BALCKE-DÜRR)	VENTAS (BALCKE-DÜRR) MILLONES DE EUR
2012	15.000	5.100	43 %	-	-
2011	18.000	4.536	35 %	689	109
2010	15.500	4.098	36 %	768	139
2009	-	4.161	-	770	144
2008	-	4.864	-	734	186

Trayectoria en CSP

SPX fabricó el generador de vapor de numerosas centrales de CSP (por ej. Nevada Solar One, EE.UU., 2007) utilizando el aceite térmico del campo solar para producir vapor.

SPX también fabricó los intercambiadores de calor necesarios para la transferencia de calor del campo solar al sistema de almacenamiento con sales fundidas de diversas centrales en España (por ej. Andasol 1 y 2, 2009).

SPX tiene un representante en Santiago de Chile (SPX Chile Limitada) pero únicamente para analizadores Bran+Luebbe, bombas, sistemas y sistemas de medición para petróleo y gas.

4.2.4. GEA Heat Exchangers

GEA Heat Exchangers es un sector del grupo GEA que ofrece intercambiadores de calor de placa, intercambiadores de calor de carcasa y tubos, intercambiadores de calor de tubo refrigerado por aire, intercambiadores de calor tubulares con revestimiento con aletas, sistemas de filtro de aire, rellenos sintéticos para diversas áreas de aplicación, torres de refrigeración húmedas y sistemas de refrigeración secos, así como tecnología para acondicionadores de aire.

GEA ofrece servicios relacionados con el diseño, la ingeniería (básica y en detalle), compras, fabricación, prueba, suministro y contratación de intercambiadores de calor para centrales de energía. GEA también fabrica condensadores refrigerados por aire para estaciones eléctricas, que pueden utilizarse en las centrales de CSP.

TABLA 16: INFORMACIÓN CLAVE SOBRE GEA GROUP (CON BASE EN LOS INFORMES ANUALES DE LA COMPAÑÍA 2009-2012)

AÑO	EMPLEADOS (GEA GROUP, TOTAL)	VENTAS (GEA GROUP, TOTAL) MILLONES DE USD	VENTAS (GEA GROUP, SECTOR INTERCAMBIADORES DE CALOR) MILLONES DE EUR	EMPLEADOS (GEA GROUP, SECTOR INTERCAMBIADORES DE CALOR)
2012	24.498	5.720	1.608	7.329
2011	23.834	5.416	1.616	7.679
2010	20.386	4.418	1.483	7.340
2009	20.693	4.411	--	--
2008	21.327	5.179	--	--

La casa matriz de GEA Heat Exchangers (HX Holding GmbH) está situada en Bochum, Alemania.

No se conoce la existencia de oficinas de GEA Heat Exchangers en Chile pero la compañía está presente en Sudamérica en Sao Paulo, Brasil, a través de "GEA do Brasil Intercambiadores Ltda".

4.2.5. Bertrams Heatec

Además de intercambiadores de sales fundidas, Bertams Heatec también ofrece soluciones de llave en mano. El capítulo 4.3.4 incluye una presentación detallada de la compañía.

Bertrams Heatec tiene una representación en Santiago de Chile (EUROPACIFIC S.A).

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

4.3. COMPAÑÍAS DE EPC

TABLA 17: RESUMEN SOBRE COMPAÑÍAS DE EPC PRESENTES EN EL MERCADO

NOMBRE DE LA COMPAÑÍA	PAÍS DE ORIGEN	PRESENCIA EN CHILE
ACS Cobra (Grupo Cobra)	España	√
Abengoa (Abengoa Solar)	España	√
Sener Ingeniería y sistemas S.A.	España	√
Bertrams Heatec (The Linde Group)	Suiza	√
KAM	Alemania	×

4.3.1. ACS Cobra (Grupo Cobra)

Desde su fundación en 1944, Grupo COBRA ha crecido para convertirse en líder mundial gracias a su capacidad y determinación para el desarrollo, construcción y operación de infraestructura industrial y centrales de energía que exigen un alto nivel de servicio.

En el campo de las centrales de CSP y el almacenamiento térmico, ACS Cobra ofrece: solución de llave en mano para la construcción, operación y mantenimiento de centrales térmicas, con colectores cilíndrico parabólicos así como torre solar. La mayoría de las centrales son las primeras del mundo con Certificado de Gestión por el uso de sistemas de almacenamiento de energía térmica con sales fundidas.

TABLA 18: INFORMACIÓN CLAVE SOBRE EL GRUPO COBRA (CON BASE EN LOS INFORMES ANUALES DE LA COMPAÑÍA 2008-2012)

AÑO	EMPLEADOS (TOTAL)	EMPLEADOS (CSP)	VENTAS (TOTAL) MILLONES DE EUR	VENTAS (SECTOR RELACIONADO CON CSP) MILLONES DE EUR
2012	18.400	~150	4.059	--
2011	17.525	S/d	3.856	--
2010	--	S/d	3.793	--
2009	--	S/d	3.484	--
2008	--	S/d	3.171	--

Principales accionistas:

- Cobra Instalaciones y Servicios, S.A.: 80%
- Recursos Ambientales, S.A.: 7,5%
- Urbaenergía, S.L: 10%

ACS Cobra está presente en Chile con aproximadamente 1.860 empleados a junio de 2014. Su oficina está situada en la comuna de Las Condes (Santiago de Chile).

Trayectoria en CSP

ACS Cobra fue la compañía de EPC de diversas centrales termosolares con colectores cilíndrico parabólicos y almacenamiento indirecto con sales fundidas. Desde 2008 ha construido centrales en Europa, como Andasol 1 y 2 y Valle 1 y 2. Con Gemasolar en España y Crescent Dunes en EE.UU. la compañía también actuó como EPC en grandes centrales con torre solar y sistema directo de almacenamiento con sales fundidas, totalizando más de 500MWel en ambas tecnologías en todo el mundo.

4.3.2. Abengoa (Abengoa Solar)

Abengoa, S.A es una multinacional con casa matriz en Sevilla, España, que incluye compañías en la industria de la energía, las telecomunicaciones, el transporte y el medio ambiente. Es una compañía global de biotecnología especializada en el desarrollo de nuevas tecnologías para la producción de biocombustibles y bioquímicos y la promoción de materias primas sostenibles.

Abengoa invierte en investigaciones sobre tecnologías sostenibles e implementa dichas tecnologías en España, además de exportarlas a todo el mundo. Entre dichas tecnologías se encuentran la energía solar concentrada, los biocombustibles de segunda generación y la desalinización.

Abengoa incursionó en la investigación de la energía solar con la construcción de componentes como helióstatos y facetas para la Torre Solar Cesa del Complejo Solar de Almería. Colaboró con el Instituto Weizmann de Israel en el diseño y la construcción de su torre de energía solar. La estrategia geográfica de Abengoa para los sistemas solares se basa en la presencia de equipos de especialistas situados en diversas ubicaciones geográficas para la promoción y venta de energía a nivel local, la fabricación de componentes a nivel regional y el desarrollo de nuevas tecnologías a escala global.

TABLA 19: INFORMACIÓN CLAVE SOBRE ABENGOA (CON BASE EN LOS INFORMES ANUALES DE LA COMPAÑÍA 2008-2012)

AÑO	EMPLEADOS (TOTAL)	EMPLEADOS (ABENGOA SOLAR)	VENTAS (TOTAL) MILLONES DE EUR	VENTAS (ABENGOA SOLAR) MILLONES DE EUR
2012	26.402	1.247	7.783	688
2011	22.261	771	7.089	345
2010	20.445	480	5.566	168
2009	23.323	388	4.147	116
2008	23.234	241	3.114	65

Anbengoa está presente en Chile con una oficina en Santiago.

Trayectoria en CSP

Abengoa construyó numerosas centrales con sistemas de almacenamiento con sales fundidas en todo el mundo. En España, Abengoa instaló centrales de CSP con más de 650MW$_{el}$ (por ej. Solonova, El Carpio). En Sudáfrica está construyendo actualmente la central con torre solar Khi Solar One con 2h de capacidad de almacenamiento.

De 2011 a 2013 Abengoa construyó la mayor central de CSP (Solana, EE.UU.) con una producción eléctrica de 280MWel y una capacidad de almacenamiento de 6h (6 sistemas paralelos con sales fundidas de 2 tanques).

En Chile, Abengoa está trabajando en una central con torre solar (Planta Solar Cerro Dominador, actualemente llamada Atacama 1) en la Comuna de Maria Elena que tendrá una producción eléctrica de 110MW$_{el}$ y una capacidad de almacenamiento superior a 17h. Se espera que el proyecto comience a operar en 2018.

4.3.3. Sener Ingenería y sistemas S.A.

Sener Ingenería y Sistemas S.A. es una empresa de ingeniería y construcción, avalada en más de 50 años de experiencia. Fundada en España, la compañía está presente en los campos de la ingeniería civil y la arquitectura, ingeniería aeroespacial, energía y procesos e ingeniería naval. Sener desarrolla sus actividades a nivel global a través de sus 17 oficinas situadas en todo el mundo.

En el campo de centrales de CSP, Sener actúa a través de su subsidiaria "Torresol Energy", fundada para promover el desarrollo tecnológico y la construcción, operación y mantenimiento de grandes centrales de CSP. Torresol, fundada en 2008, es el resultado de una alianza entre Sener (propietaria de un 60%) y MASDAR, una compañía de energía alternativa situada en el Emirato de Abu Dhabi (propietaria del 40%). Las actividades de la compañía se desarrollan en centrales situadas en el sur de Europa, el Norte de África, Medio Oriente y Estados Unidos.

Sener también dedica gran parte de sus actividades al desarrollo de nuevos conceptos de almacenamiento. Sener construyó la primera central piloto con sistema de almacenamiento de un tanque con sales fundidas en "la central de CSP Valle".

TABLA 20: INFORMACIÓN CLAVE SOBRE SENER (CON BASE EN LOS INFORMES ANUALES DE LA COMPAÑÍA 2008-2012)

AÑO	EMPLEADOS (TOTAL)	VENTAS (TOTAL) MILLONES DE EUR	VENTAS (DIVISIÓN INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN) PARTICIPACIÓN EN LAS VENTAS TOTALES
2012	5.458	1.174	~50 %
2011	5.165	1.159	~51 %
2010	5.005	1.066	~51 %
2009	4.916	937	~46 %
2008	4.573	845	--

Con más del 98% del capital, el principal accionista de Sener es la familia fundadora.

Sener está presente en Chile con una oficina en Santiago.

Trayectoria en CSP

Con la torre Gemasolar (España, 2012) Sener/Torresol construyó y opera el primer sistema de torre solar con sal fundida con una capacidad de almacenamiento de 16h y una producción de energía eléctrica de 19,9MW$_{el}$.

Sener/Torresol también construyó y opera dos centrales con colectores cilíndrico parabólicos (Valle 1 y 2, España).

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

4.3.4. Bertrams Heatec (The Linde Group)

Bertrams Heatec, con casa matriz en Suiza, brinda soluciones para transferencia de calor en procesos, particularmente para las industrias química y petroquímica. La compañía ofrece todos los componentes y servicios relacionados, incluida la fase de diseño y desarrollo, la construcción de la central y la puesta en marcha.

En el campo de CSP y sistemas con sales fundidas, Betrams Heatec ofrece servicios de ingeniería y diseño de unidades de fundición para sales fundidas, intercambiadores de calor entre HTF sal fundida-aceite y sistemas de almacenamiento completos para centrales de CSP, gracias a sus más de 50 años de experiencia en el manejo de sales fundidas en centrales de transferencia de calor. Junto con Linde Engineering, también actúa como compañía de EPC para sistemas completos de almacenamiento con sales fundidas, ofreciendo soluciones de llave en mano.

Bertrams Heatec pertenece a "The Linde Group". En los grandes proyectos comerciales, Bertrams Heatec es apoyado por su socio Linde Engineering.

TABLA 21: INFORMACIÓN CLAVE SOBRE LINDE GROUP (CON BASE EN LOS INFORMES ANUALES DE LA COMPAÑÍA 2008-2012 Y UNA ENTREVISTA CON REPRESENTANTES DE LA COMPAÑÍA)

AÑO	EMPLEADOS (LINDE GROUP, TOTAL DE LA COMPAÑÍA)	EMPLEADOS (BERTRAMS HEATEC)	VENTAS (LINDE GROUP, DIVISIÓN INGENIERÍA) MILLONES DE EUR	VENTAS (LINDE GROUP, TOTAL DE LA COMPAÑÍA) MILLONES DE EUR
2012	61.965	~45	2.561	15.280
2011	50.417	--	2.531	13.787
2010	48.430	--	2.461	12.866
2009	--	--	--	11.211
2008	--	--	--	12.663

Bertrams Heatec tiene un representante con oficina en Santiago de Chile (EUROPACIFIC S.A).

The Linde Group también tiene presencia en América del Sur. Está en Brasil a través de "Linde Engenharia Do Brasil Ltda." situada en Río de Janeiro.

Trayectoria en ESC

Betrams Heatec construyó tres unidades iniciales con sales fundidas en España y el sistema de calentamiento auxiliar de nitrato de un proyecto de energía solar en dicho país. También prestó servicios de diseño de ingeniería de etapa inicial (FEED - Front End Engineering Design) para el sistema de almacenamiento de energía termosolar de Andasol 3 (Almería, España).

Actualmente es la compañía de Ingeniería y Contrataciones (EP - Engineering and Procurement) de dos centrales piloto con sales fundidas de alta temperatura (hasta 550°C).

4.3.5. KAM

Kraftanlagen München (KAM), con casa matriz en Munich, Alemania, tiene 55 años de experiencia como constructora de sistemas de tuberías y centrales de energía. KAM se desempeña en los campos de tecnología para centrales de energía convencionales, energías renovables, mantenimiento y servicio de centrales y en las industrias química y petroquímica.

En el campo de la tecnología de CSP, KAM realiza desde 2002 proyectos de investigación propios en España y Alemania. Además de sus actividades de investigación y desarrollo sobre receptores volumétricos abiertos para sistemas con torre solar y el sistema de almacenamiento de tipo panal de abeja, la compañía presta servicios de EPC para proyectos de energía termosolar.

TABLA 22: INFORMACIÓN CLAVE SOBRE KAM (CON BASE EN UNA ENTREVISTA REALIZADA A REPRESENTANTES DE LA COMPAÑÍA Y A LOS INFORMES ANUALES 2010-2012; TIPO DE CAMBIO PARA ALPIQ HOLDING 1EUR/0,833 CHF)

AÑO	EMPLEADOS (KAM)	EMPLEADOS (DIVISIÓN KAM-CSP)	VENTAS (KAM) MILLONES DE EUR	VENTAS (ALPIQ HOLDING) MILLONES DE EUR
2012	2.586	~20	451	10.578
2011	2.683	--	397	11.630
2010	2.294	--	366	11.748

KAM pertenece a Alpiq Holding AG, una compañía suiza que se desempeña en el sector eléctrico, y no pareciera tener oficina en Chile.

Trayectoria en CSP

Kraftanlagen München (KAM) fue responsable de la ingeniería y producción de un receptor de alta temperatura para una torre piloto de la Plataforma Solar (España).

Para la central piloto con torre solar de 1,5MW$_{el}$ situada en Jülich (Alemania, 2006), la compañía se desempeñó como contratista de ingeniería, suministros, construcción y contrataciones, bajo la modalidad llave en mano.

En la actualidad, KAM está desarrollando un proyecto de torre solar híbrida en Argelia.

5. Desarrollo tecnológico

5.1. AVANCES EN EL DESARROLLO TÉCNICO DE LAS TECNOLOGÍAS COMERCIALES

El avance en el desarrollo de las tecnologías de almacenamiento térmico actuales disponibles comercialmente para las centrales de CSP aún continúa. El objetivo principal de dicho desarrollo es reducir los costos del sistema. Para lograrlo, se está investigando la posibilidad de lograr temperaturas más elevadas para aumentar la eficiencia del sistema y se buscan soluciones para reducir los costos totales del sistema.

5.1.1. Almacenamiento con sales fundidas

Material de almacenamiento

Uno de los principales desafíos es ampliar el rango de temperatura operativa de las sales fundidas y así disminuir los límites de temperatura inferior. Un mayor rango térmico permitiría mayores densidades energéticas para el sistema de almacenamiento, lo cual da como resultado menos espacio ocupado y mayores ahorros de costos en el material de almacenamiento. Las reducciones de costos logradas gracias a la mayor densidad energética tienen como contrapartida los costos adicionales derivados del mayor costo de material de las nuevas mezclas de sales técnicamente sofisticadas. El hecho de extender el rango térmico para disminuir las condiciones operativas facilita el completo manejo y la protección anticongelamiento del sistema y mejora el comportamiento del sistema en relación a la pérdida de calor y autoconsumo. Además mejora la operación de la central, incluidos los procedimientos diarios de arranque y parada. El desafío consiste en modificar las características del medio de almacenamiento de calor sin perder su estabilidad química a altas temperaturas. Las nuevas sales abarcan todo el rango de nitratos y nitritos y todos sus tipos de mezclas. Además de los parámetros principales como capacidad calorífica específica, estabilidad térmica a largo plazo, temperaturas de solidificación y viscosidad, también se debe considerar la disponibilidad en el mercado y los costos de los posibles aditivos y las nuevas mezclas.

Existen diversos estudios (por ej. (Bauer, Breidenbach, Pfleger, Laing y Eck, 2012), (Federsel, Wortmann y Ladenberger, 2014)) y trabajos experimentales en desarrollo cuyo objetivo es encontrar nitratos, mezclas y aditivos adecuados. Se espera que dentro de los próximos años ingresen al mercado nuevas e innovadoras mezclas de sales que posibiliten mayores rangos térmicos que las actuales mezclas de sal solar.

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Diseño del sistema (sistema con 1 tanque)

Para que el diseño del sistema de sales fundidas resulte técnica y económicamente más eficiente, se está investigando el uso de sistemas con un tanque. A diferencia de la solución con 2 tanques, el sistema de almacenamiento de tanque único consta de un tanque thermoclin que contiene todo el fluido de almacenamiento frío y caliente. Los dos fluidos están separados por una barrera que flota entre ellos y que los aísla y separa físicamente. La Figura 21 muestra el esquema de un primer prototipo construido por Sener.

En modalidad de carga, el fluido frío del fondo del tanque es calentado y regresa a la parte superior del tanque. Para descargar el sistema, el fluido caliente es extraído y el fluido frío regresa al fondo del tanque. Con este método el tanque siempre trabaja a plena carga.

Una de las dificultades en este tipo de sistema es la barrera que separa y aísla los fluidos caliente y frío. Por un lado, la barrera debe ser móvil y el fluido debe poder mover la barrera. Por otrolado, la barrera debe ser lo suficientemente rígida para soportar la carga de presión ejercida por el fluido almacenado. Según (Lata y Blanco, 2010), la barrera debe incluir materiales resistentes a la compresión que eliminen cualquier tipo de problema relacionado a deformaciones térmicas, de modo tal que la carcasa exterior de la barrera debe ser del mismo material que la carcasa del tanque y debe tener en su interior ciertos materiales de relleno.

Incluso en el pequeño prototipo con capacidad de almacenamiento de calor de 24MWhth, la barrera se desplaza una distancia de 8,3m (Querol, Olano y Lata, 2012).

Para que el sistema con tanque único resulte comercialmente viable, es necesario reducir las pérdidas térmicas en un 50% (lo cual aumenta la eficiencia) y los costos de inversión respecto de la solución con 2 tanques. Dado que el sistema con tanque único se encuentra siempre lleno, es posible utilizar bombas convencionales. A diferencia de la solución con 2 tanques, que requieren de bombas verticales que son más costosas, el hecho de utilizar bombas convencionales permite disminuir aún más los costos.

5.1.2. Sistema de tanques Ruth

Teniendo en cuenta el diseño del sistema, no se prevén mayores desarrollos en el sistema de almacenamiento con tanques Ruth. Debido a que el sistema solo entrega vapor saturado, el principal desafío de este tipo de sistema de almacenamiento es la combinación con una fase de sobrecalentamiento.

Combinación con otros colectores

Debido al diseño del sistema, los sistemas de tanques Ruth producen nada más que vapor saturado. Para aumentar la eficiencia del ciclo del vapor se requiere de temperaturas más elevadas, lo cual requiere el uso de vapor sobrecalentado. Para producir este tipo de vapor, un segundo "colector de sobrecalentamiento" se agrega detrás del sistema de tanques Ruth, tal como lo muestra la Figura 22.

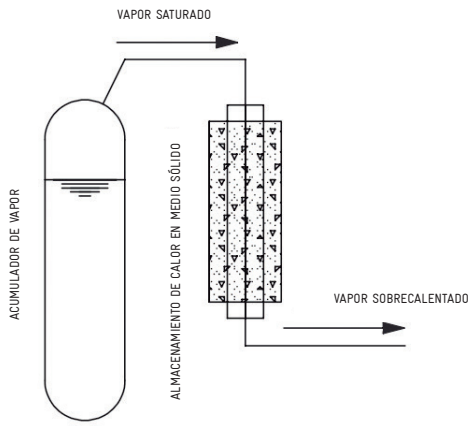


FIGURA 22: COMBINACIÓN DE ACUMULADOR DE VAPOR CON UN COLECTOR ADICIONAL DE SOBRECALENTAMIENTO (STEINMANN Y ECK, 2006)

Los posibles sistemas de almacenamiento pueden ser sistemas de calor sensible como los sistemas de almacenamiento de calor con medio sólido (por ej. rocas o arena) o con sales fundidas. En la mayoría de las centrales de CSP se requiere de una pequeña cantidad (cerca del 15%) de energía para realizar el sobrecalentamiento, lo cual hace que el sistema de almacenamiento para el sobrecalentamiento sea significativamente más pequeño que para el acumulador de vapor.

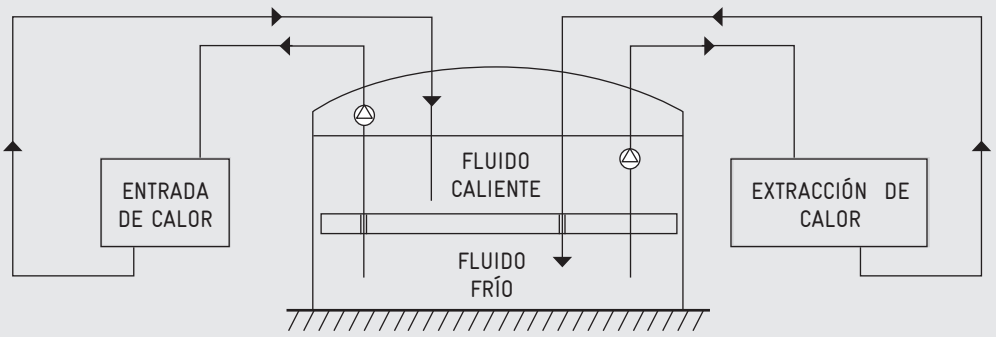


FIGURA 21: ESQUEMA DE SISTEMA DE ALMACENAMIENTO CON UN SÓLO TANQUE CON BARRERA DE AISLACIÓN FLOTANTE (QUEROL, OLANO Y LATA, 2012)

5.2. NUEVOS MATERIALES DE ALMACENAMIENTO

Entre los sistemas de almacenamiento térmico existentes y disponibles comercialmente para las centrales de CSP, existen muchos otros conceptos de almacenamiento térmico que ya se utilizan en aplicaciones industriales a niveles inferiores de temperatura o a menor escala.

Estas nuevas tecnologías de almacenamiento tienen gran potencial en términos de reducir el costo de los sistemas de almacenamiento, brindar una capacidad de almacenamiento mayor o permitir una aplicación más sencilla dentro de la central de CSP.

Sistemas de almacenamiento termoquímicos

Los sistemas de almacenamiento termoquímicos ofrecen un enorme potencial en términos de capacidad calorífica volumétrica, rango térmico y posibilidades de almacenamiento. La energía térmica se almacena mediante el uso de reacciones químicas reversibles. El sistema de almacenamiento se carga suministrando energía a una reacción química. En esta reacción, el compuesto químico se divide en sus elementos básicos. Con la reacción contraria, los elementos básicos reaccionan, se libera energía térmica y el sistema se descarga.

Si bien potencialmente existen numerosos compuestos químicos que están siendo investigados, es un gran desafío realizar un sistema de almacenamiento de estas características a gran escala. Aunque existen algunos desarrollos incipientes (por ej. un reactor con lecho móvil), no se espera que este tipo de sistemas tenga aplicación comercial en los próximos años.

Material de cambio de fase

Los sistemas de almacenamiento con material de cambio de fase son sistemas de almacenamiento de calor latente que utilizan el cambio de fase del material (de sólido a líquido) para almacenar el calor. Como materiales se utilizan compuestos químicos con punto de fusión fijo. Ya que cada material tiene su punto de fusión fijo, se requieren diferentes materiales para diferentes aplicaciones. Las centrales de generación directa de vapor con presión deslizante también requieren diferentes materiales para diferentes puntos establecidos de presión.

Una gran ventaja de los sistemas con material de cambio de fase es la elevada capacidad de almacenamiento volumétrico del material, lo cual permite utilizar un recipiente de dimensiones pequeñas.

Una de las dificultades del sistema es el relativamente bajo coeficiente de transferencia de calor entre el material de cambio de fase y el fluido de transferencia de calor. Para lograr altos índices de carga y descarga, la superficie disponible para la transferencia de calor debe ser lo más grande posible. En las centrales piloto, esto se realiza mediante tubos con aletas. Otras de las dificultades de este tipo de sistemas son los costos del material en sí y la estabilidad térmica a largo plazo en condiciones de temperaturas elevadas.

La Figura 23 muestra la posible integración de un sistema de almacenamiento con material de cambio de fase en combinación con dos sistemas de calor sensible en una central de generación directa de vapor. Los sistemas de calor sensible (A y D) se utilizan para precalentar (A) el agua suministrada al sistema y recalentar (D) el vapor.

El almacenamiento con material de cambio de fase (como almacenamiento de calor latente) se utiliza para evaporar el agua suministrada al sistema. En esta central piloto, el agua suministrada al sistema se calienta hasta el punto de evaporación a unos 295°C. Debido a que se utiliza nitrato de sodio ($NaNO_3$) como material de cambio de fase, la temperatura de fusión alcanza los 306°C. El agua precalentada ingresa al módulo del material de cambio de fase y la energía almacenada en dicho material se utiliza para evaporar el agua. Luego de abandonar el tambor de vapor, el vapor saturado se utiliza para recalentar el vapor. Para la descarga, el vapor ingresa en el sistema de almacenamiento con material de cambio de fase a una temperatura levemente superior al punto de, saturación donde se condensa (Laing, Bahl, & T., 2012).

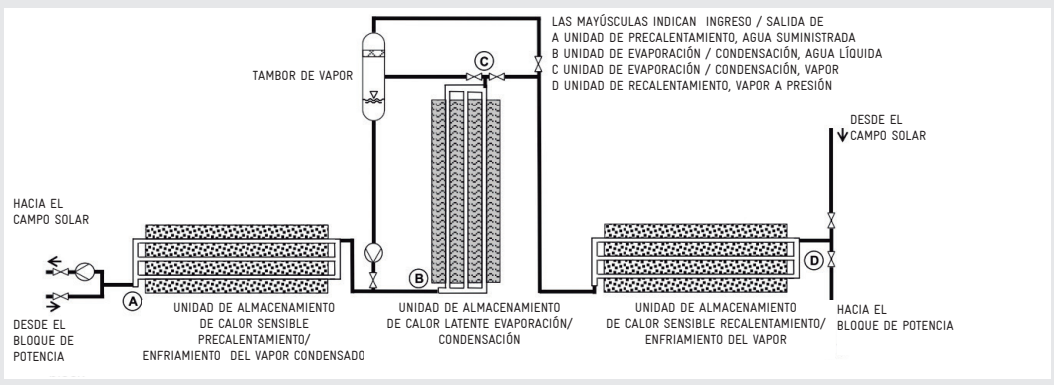


FIGURA 23: DESCRIPCIÓN DE UN CONCEPTO DE ALMACENAMIENTO TÉRMICO DE TRES ETAPAS QUE COMBINA ALMACENAMIENTO CON CALOR SENSIBLE Y LATENTE (LAING, BAHL Y T., 2012)

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Dado que los sistemas con material de cambio de fase ofrecen un elevado potencial para la tecnología de CSP, numerosos centros de investigación están estudiando diversos materiales para diferentes rangos de temperatura (por ej. la University of Stellenbosch de Sudáfrica está trabajando en un material de cambio de fase a base de AlSi12 con punto de fusión a 577°C combinado con un fluido de transferencia de calor de alta temperatura (Kotzé, Backström, & Erens, 2012))

No obstante, aún quedan desafíos por superar, especialmente relacionados con los costos de los materiales. Dentro de cinco años, es posible que haya sistemas de almacenamiento con material de cambio de fase disponibles en combinación con otros tipos de sistemas de almacenamiento térmico.

Sistemas de almacenamiento de lecho empacado

Los conceptos de almacenamiento que utilizan un material sólido para almacenar calor sensible son considerados como un elemento fundamental para reducir los costos de los sistemas de almacenamiento de energía térmica, ya que permiten reducir los costos totales del sistema de CSP. Numerosos institutos de investigación (como el instituto DLR en Alemania, NREL en Estados Unidos o la Universidad Stellenbosch en Sudáfrica) y compañías (como Airlight en Suiza o Storasol en Alemania) están desarrollando diversos conceptos de almacenamiento usando un material de bajo costo y disponible localmente.

El material de almacenamiento suele colocarse en un sistema de lecho empacado y se utiliza aire para transferir el calor. Los sistemas con lecho empacado consisten en material sólido empacado por el que circula aire. Similar al sistema de almacenamiento de calor de tipo panal de abeja descrito en el capítulo 2.3.3. ya que requiere de una superficie de intercambio de calor bien amplia para lograr una buena transferencia de calor. En el sistema de lecho empacado, el aire caliente ingresa por un extremo del lecho, fluye a través del lecho donde el calor se transfiere al material de almacenamiento y abandona el lecho a baja temperatura. La barrera térmica dentro del lecho empacado que separa la parte caliente de la parte fría del lecho se denomina thermoclin. Para lograr una adecuada eficiencia de almacenamiento, la zona thermoclin debe ser lo más pequeña posible.

El lecho empacado puede disponerse de dos formas distintas: el aire caliente puede fluir vertical u horizontalmente a través de la capa, lo cual da como resultado distintos diseños del recipiente de almacenamiento. Para visualizar los procesos principales, la Figura 24 muestra las principales características de los sistemas de lecho empacado con flujo horizontal.

Para cargar el sistema, el aire caliente ingresa al sistema de almacenamiento y es dirigido al material de almacenamiento, por donde fluye de forma horizontal. Con esta disposición del lecho empacado se logra una gran superficie. La principal dificultad del sistema es lograr una distribución pareja del aire caliente en cada lecho.

Otro parámetro fundamental en el diseño de un sistema de lecho empacado es la pérdida de presión a través del lecho, dado que si la pérdida es elevada, se consume gran cantidad de energía y el sistema pierde eficiencia.

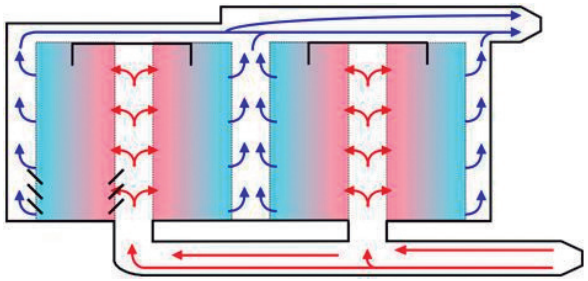


FIGURA 24: ESQUEMA DE FLUJO A TRAVÉS DE UN SISTEMA DE FLUJO HORIZONTAL, SEGÚN (SCHNEIDER Y MAIER, 2013)

En resumen, los parámetros clave de un sistema de almacenamiento con medio sólido son los siguientes:

- Material de almacenamiento de bajo costo y disponible localmente con elevada capacidad calorífica y buen coeficiente de transferencia de calor;
- Tamaño del material y sección transversal libre entre el material de almacenamiento, lo cual incide en la transferencia de calor y en la pérdida de presión, lo que genera mayor autoconsumo;
- Estabilidad térmica prolongada del material de almacenamiento;
- Diseño adaptado del lecho empacado, que permite una menor zona thermoclin y una baja pérdida de presión a través del sistema.

Arena y rocas son utilizadas como material de almacenamiento, aplicables en un rango de temperatura amplio, donde las únicas restricciones térmicas están dadas por el punto de fusión de las rocas. La Tabla 23 muestra una lista de diversos materiales junto con sus propiedades termodinámicas, según (Singh, Saini y Saini, 2010). Existen diversos trabajos experimentales en curso que estudian y evalúan la estabilidad de las rocas a altas temperaturas y el funcionamiento del ciclo de almacenamiento, resumidos en (Singh, Saini y Saini, 2010).

TABLA 23: PARÁMETROS DEL MATERIAL DE ALMACENAMIENTO SELECCIONADO

MEDIO	DENSIDAD (KG/M³)	CALOR ESPECÍFICO (J/KGK)	CAPACIDAD CALORÍFICA 106(J/M³K)	CAPACIDAD CALORÍFICA VOLUMÉTRICA[5] (KWH/M³)
Ladrillo	1698	840	1,4263	178
Hormigón	3000	1130	2,5310	316
Piedra, granito	2640	820	2,1648	270
Piedra, arenisca	2200	710	1,5620	195
Aluminio	2707	896	2,4255	303

5 Calculado para un rango térmico de 450K, suponiendo una caída en la temperatura del sistema de almacenamiento de calor de 570°C a 120°C, sin considerar sección transversal libre.

Sistema CellFlux (DLR)

El Centro Aeroespacial Alemán (DLR) en Stuttgart, Alemania, ha construido recientemente un centro de pruebas para sus sistemas de almacenamiento de lecho empacado denominado sistema CellFlux. La investigación y desarrollo se realizaron con fondos aportados por la compañía E.On.

El sistema utiliza aire ambiental como medio de transferencia de calor y piedras de ladrillo con agujeros como medio de almacenamiento. La Figura 25 muestra la disposición de los diferentes componentes del sistema.

FIGURA 25: SISTEMA CELLFLUX (ODENTHAL, STEINMANN Y ECK, 2014)

Referencias:

- Fan: ventilador.
- Insulation: aislación.
- Solid storage material: material de almacenamiento sólido.
- Heat exchanger: intercambiador de calor.

Por ahora no se conocen más detalles del sistema pero se espera que DLR anuncie más información durante el simposio "EnergieSpeicherSymposium 2015" a desarrollarse en dicho centro espacial en Stuttgart, Alemania.

5.3. INFLUENCIA EN EL SISTEMA DE CSP

Este capítulo analiza la influencia de los desarrollos esperados en algunos puntos clave del sistema de CSP. El estudio se centra en las tecnologías más avanzadas, por lo que todas las mejoras logradas (por ejemplo, reducciones de costos específicos) están marcadas con un signo "+". Si existe un efecto negativo (por ejemplo, una disminución en una capacidad de almacenamiento específica), el componente lleva un signo "–".

En especial con respecto a los costos específicos, se incluyen diversos parámetros parcialmente antagónicos. Considerando por ejemplo el "nuevo material de sales fundidas", si bien se prevé que los nuevos componentes de las sales sean más costosos, se requiere de menos material debido a la capacidad calorífica específica. En resumen, se espera una reducción de costos.

Todos los nuevos desarrollos tecnológicos tendrían un impacto positivo en la central de CSP en su conjunto. Se espera una mejora significativa de la tecnología de almacenamiento, en particular relacionada con nuevos conceptos de almacenamiento y materiales. Debido a que el sistema de almacenamiento térmico debe incluirse en la central de CSP, todos los desarrollos deben relacionarse siempre con el desarrollo de la tecnología de CSP en sí.

6 Evaluación de la influencia: -- negativa; - algo negativa; o neutra; + algo positiva; ++ positiva; +++ significativamente positiva

TABLA 24: INFLUENCIA DE LAS INNOVACIONES EN EL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO

TECNOLOGÍA / DESARROLLO	ETAPA DE DESARROLLO	TEMP. MÁX.	REDUC-CIÓN DE COSTOS ESPECÍFICOS DEL SISTEMA DE CSP	CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO ESPECÍFICA (RESPECTO DE LA TECNOLOGÍA MÁS AVANZADA)	AJUSTE FLEXIBLE DE TAMAÑO Y CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO	AUMENTO DE LA EFICIENCIA DEL SISTEMA DE CSP
Nuevo material de sales fundidas	Análisis detallado	560–580°C	+[6]	+	o	++
Sistema de un tanque para sales fundidas	Planta piloto	560°C	++	o	-	+
Combinación de sist. de tanques Ruth con etapa de sobrecalentamiento		550°C	-	-	+	+
Almacenamien-to termoquímico	Investigación básica	Desconocido, en teoría superior a 900°C	Sin estimación posible	+++	Sin estimación posible	++
Almacenamiento con material de cambio de fase	Planta piloto	380°C (hasta 580°C)	-	++	+	o
Almacenamiento con lecho empacado	Planta piloto	hasta 800 °C	++	+	+++	+

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

6. Resumen y conclusión con respecto a Chile

La tecnología de CSP ofrece una gran posibilidad de producir energía eléctrica despachable e inocua para el medio ambiente. Independientemente de la tecnología de CSP utilizada (colector cilíndrico parabólico, colector lineal Fresnel o torre solar), la radiación solar directa se concentra en un absorbedor y se utiliza para calentar un fluido de transferencia de calor. El calor generado puede utilizarse para alimentar un bloque de potencia generador de vapor o bien almacenarse en un sistema de almacenamiento térmico. En caso de existir demanda adicional de energía eléctrica, el sistema de almacenamiento libera la energía almacenada generando la energía eléctrica necesaria.

Con este principio de sistema de almacenamiento integrado, las centrales de CSP ofrecen una ventaja si se comparan con otras tecnologías renovables nuevas, como las centrales eólicas o hidroeléctricas sin embalse. La capacidad de almacenar energía durante cierto periodo de tiempo permite lograr un perfil de generación muy flexible. Por lo tanto, los sistemas de almacenamiento térmico desempeñan un papel fundamental en el diseño y desarrollo de centrales de CSP.

Más de la mitad de las centrales de CSP en funcionamiento y casi todas las centrales en construcción están equipadas con sistema de almacenamiento térmico. En mercados especiales (como Sudáfrica) los generadores no pueden ingresar al mercado si no cuentan con un sistema de almacenamiento térmico. Esto, debido a restricciones establecidas en diversas políticas, tarifas de tipo "feed-in" durante horas de máxima demanda u otras restricciones. En resumen, existen dos motivos clave para el uso de sistemas de almacenamiento: por un lado, el almacenamiento de energía térmica adicional contribuye a la estabilidad del sistema eléctrico y, por otro, el almacenamiento adicional aumenta la cantidad de energía producida y disminuye los costos específicos de generación eléctrica.

Los sistemas de almacenamiento térmico no se utilizan únicamente en las centrales de CSP. Todas las tecnologías de punta e incluso algunos de los principios de almacenamiento en desarrollo se utilizan a pequeña escala en aplicaciones industriales, lo cual constituye una buena experiencia operativa para los principales sistemas.

Todas las tecnologías mencionadas tienen su propio campo de operación. El acumulador de vapor, denominado sistema de tanques Ruth, se implementa en las centrales de CSP con generación de vapor directa y se utiliza como almacenamiento "buffer" a corto plazo. El sistema de almacenamiento cerámico de tipo panal de abeja utiliza un material de almacenamiento sólido y se implementa en torres solares con aire ambiente. El sistema de almacenamiento de 2 tanques con sales fundidas es la tecnología más madura. Tiene amplia implementación en los sistemas con colectores cilíndrico parabólicos con aceite térmico como fluido de transferencia de calor dentro de los sistemas de almacenamiento indirecto o en torres solares que utilizan sales solares como fluido de transferencia de calor, dentro de los sistemas de almacenamiento directo. Permite almacenar energía por hasta 16h, lo cual permite que la central de ESC genere electricidad a partir del sol incluso por la noche.

Los sistemas de almacenamiento térmico ofrecen un enorme potencial para Chile, en particular considerando las actividades mineras locales. El norte de Chile concentra las principales operaciones de minería del país y sus minas producen alrededor del 35% de la demanda mundial de cobre. La mayor parte de la energía eléctrica del norte de Chile se produce en centrales que operan a base de carbón y en mucha menor medida por motores o turbinas a gas. La electricidad también se utiliza para bombear agua de mar desalinizada hacia las minas, que demandan suministro energético de bajo costo y confiable. Es necesario implementar tareas de creación de capacidades de mano de obra local que opera y realiza el mantenimiento del sistema de almacenamiento térmico en paralelo a la central de CSP porque ambos sistemas se encuentran íntimamente interconectados. El conocimiento científico y de ingeniería existente sobre las necesidades y desafíos locales puede utilizarse para desarrollar soluciones "locales" especializadas, particularmente relacionadas con el almacenamiento de sales fundidas.

Hasta la fecha, la demanda energética se satisface principalmente con centrales que operan a base de carbón, como Angamos I y II con una capacidad de 260MWel cada una, y dicho mineral se importa del mercado internacional. Para estabilizar la red energética local, en algunos casos se integran sistemas de almacenamiento en las centrales. Sin embargo, ninguna de las dos centrales pareciera suministrar energía térmica a las minas, un tipo de energía que también presenta altos niveles de demanda. La energía térmica suele obtenerse mediante la combustión de aceite pesado, diesel o gas en las minas.

El uso de sistemas de almacenamiento térmico en conjunto con tecnologías de CSP permitiría generar energía eléctrica y térmica localmente, de forma constante y confiable tanto durante el día como también durante la noche. La estabilización de las operaciones de la red eléctrica también podría lograrse mediante el uso de sistemas de almacenamiento térmico durante los dos ciclos del día. Además, la operación de las centrales no dependería del carbón o de combustibles fósiles, en su mayor parte comprados e importados desde el mercado global. La energía solar se aprovecha como fuente de combustible gratuita e independiente de los desarrollos del mercado global de combustibles.

En favor de lo anterior, un estudio (Philipp Stuckenbrock, 2012) ha llegado a la conclusión de que las centrales de CSP para operaciones de minería pueden posibilitar un ahorro en costos asociados al combustible fósil e incluso aumentar la eficiencia de la producción en el proceso de minería de las minas de cobre. Los proyectos híbridos que generan energía térmica y eléctrica tienen potencial y son rentables.

Las difíciles condiciones ambientales en torno a las minas no representan un problema para los sistemas de almacenamiento. La radiación ultravioleta (UV) no tiene ningún impacto en los sistemas de almacenamiento y sus componentes, gracias a que están provistos de aislación térmica adecuada resistente a dicha radiación. La aislación también protege a los sistemas de almacenamiento de otros impactos ambientales locales como el polvo, las sales, los fuertes vientos y las importantes variaciones térmicas. No obstante, cabe destacar que los efectos del polvo, las sales, los fuertes vientos y la escasez de agua pueden representar un problema para las tecnologías de CSP en sí.

Es posible concluir que el potencial de las tecnologías de almacenamiento en Chile es elevado, no sólo en relación con las capacidades de producción locales, en especial de las operaciones de minería, sino también respecto de los avances en el desarrollo de estas tecnologías. Con los avances en el desarrollo de las tecnologías de CSP para admitir mayores rangos de temperatura, aumenta la importancia de los nuevos conceptos de almacenamiento y de los materiales.

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

7. Referencias

(S/d). Información consultada el 13 de febrero de 2012 en www.nrel.gov/csp/troughnet/pdfs/2007/martin_andasol_pictures_storage.pdf

(S/d). Información consultada el 13 de febrero de 2012 en www.greentechmedia.com/wp-content//uploads/2008/07/andasol3.jpg

Adaptado con base en el folleto de Torresol energy Gemasolar. (S/d).

Alcauza, J. (30. 12 2013). RREEFF, Antin and Eiser sue Spain over changes in CSP regulation framework. CSP World.

Alvarez, G., Jara, R., Julián, J. y Bielsa, J. (2010). Study of the effects on employment of public aid to renewable energy sources. Procesos de mercado. Volumen VII.

Anderson, S. (2014). Minerals yearbook: The mineral industry of Chile. US Geological Survey.

Andrews Kurth LLP. (06. 08 2014). Renewable energy projects in Chile: Obtaining PPAs and wining financing in a crowded marketplace. Abgerufen am 08. 08 2014 von www.greenpowerconferences.com

Asociación de Productores de Energías Renovables. (2012). Estudio del Impacto Macroeconómico de las Energías Renovables en España 2012. Madrid, España: APPA.

Azcárraga, G. (04. 09 2012). Evaluating the effectiveness of molten salt storage with solar plants. Abgerufen am 22. 11 2013 von www.ises-online.de/fileadmin/user_upload/PDF/Molten_salt_tower_plant_GA_Azcarraga.pdf

Bauer, T., Breidenbach, N., Pfleger, N., Laing, D. y Eck, M. (2012). Overview of molten salt storage systems and material development for solar thermal power plants. Foro mundial sobre energías renovables. Denver, EE.UU.

Agencia Central de Inteligencia. (kein Datum). The World Factbook. Abgerufen am 14. 07 2014 von www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook

CIO Wealth Management Research. (2012). Preise und Löhne 2012. Zürich, Switzerland: UBS AG.

Coastal Chemical Co. . (2011). HITEC Heat Transfer Salt. Houston, USA: Coastal Chemical Co.

CSP Today. (2014). CSP in the USA: A guide to domestic growth and exporting american know-how. CSP-Today.

Döhne, O., & Erwes, H. (2012). Oil & Gas Brasilien. Rio de Janeiro, Brasil: Deutsch-Brasilianische Industrie- und Handelskammer.

Ellermann, S. (2012). Wirtschaftstrends Jahreswechsel 2012/2013 - Chile. Santiago de Chile: Germany Trade & Invest.

Federsel, K., Wortmann, J., & Ladenberger, M. (2014). High-temperature and corrosion behavior of nitrate nitrite molten salt mixtures regarding their application in concentrating solar power plants. SolarPaces Conference. Beijing.

FLABEG Solar. (2012). Best Performance, most experience: Solar Mirrors for CSP and CPV. Nürnberg, Alemania: FLABEG Holding GmbH.

Gazzo, A., Kost, C., & Ragwitz, M. (2011). MENA: Assemssment of the local manufacturing potential for CSP Projects. Washington DC, EE.UU.: Banco Mundial.

Hermann, U., & Kearney, D. (2000). Survey of thermal storage for parabolic trough power plants. Golden, Estados Unidos: NREL.

Herrmann, U. (2013). Speicherrelevanz für CSP, Technologiebeispiel Flüssigsalzspeicher. DLR Energiespeicher Symposium. Stuttgart.

Herrmann, U., & Pfänder, M. (2013). FLAGSOL: Erfahrung aus mehr als 10 Jahren Solarfeld-Engineering. 16. Kölner Sonnenkolloqium. Colonia, Alemania.

Banco Interamericano de Desarrollo. (2013). Chile Proyecto CSP CTF-BID. BID.

Agencia Internacional de la Energía (AIE). (2013). Estadísticas energéticas: España. Abgerufen am 20. 01 2014 von www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/

IRENA. (2012). Renewable energy technologies: cost analysis series. Concentrating Solar Power. Bonn, Alemania: IRENA.

Kolb, G., Ho, C., Mancini, T., & Gary, J. (2011). Power tower technology roadmap and cost reduction plan. Albuquerque, EE.UU.: Sandia National Laboratories.

Kotzé, J., Backström, T., & Erens, P. (2012). Evaluation of a latent heat thermal energy storage system using AlSi12 as a phase change material. SolarPACES 2012. Marrakesch, Marruecos.

Krenzlin, M., Wandelt, A., & Glatz, A. (2012). Erneuerbare Energien in Chile 2012: Zielmarktanalyse. Santiago de Chile: AHK Chile.

Krüger, M., Hahn, J., & Zunft, S. (2011). Thermodynamic and fluidic investigation of direct contact solid heat storage for solar tower power plants. ISES Solar World Congress 2011 (SWC 2011). Kassel, Alemania.

Kulichenko, N. (2012). Concentrating Thermal Solar - lessons from different countries. Banco Mundial.

Kulichenko, N., & Wirth, J. (2011). Regulatory and financial incentives for scaling up CSP in developing countries. Washington D.C., EE.UU.: Banco Mundial.

Laing, D., Bahl, C., & T., B. (2012). Thermal energy storage for direct steam generation. SolarPACES. Marrakesch, Marruecos.

Lata, J., & Blanco, J. (2010). Single tank thermal storage design for solar thermal power plants. SolarPACES 2010. Perpignan, Francia.

Leitner, M. (2007). Chile-attraktiver Einstiegsmarkt und gutes Sprungbrett für eine regionale Expansion. Die Volkswirtschaft(5), 48-51.

Lüpfert, E. (2013). Overview on Norms and Standards for SolarEnergy Technology Relevant for CSP Development and Implementation. 4th SFREA Summer School. Homberg, Alemania.

Ma, Z., Glatzmaier, G., Turchi, C., & Wagner, M. (2012). Thermal energy storage performance metrics and use in thermal energy storage design. Procedimientos del Foro Mundial sobre Energías Renovables. Boulder, EE.UU.

Massey, J. (22 de julio de 2014). Three key drivers of renewable energy growth in Chile. Abgerufen am 28. Julio de 2014 von www.greenpowerconferences.com

Nandi, B., Bandyopadhyay, S. y Banerjee, R. (2012). Analysis of high temperature thermal energy storage for solar power plant. IEEE ICSET. Nepal.

NSG Group. (2011). NSG Group and the flat glass industry 2011. Tokyo: Nippon Sheet Glass.

Odenthal, C., Steinmann, W.-D. y Eck, M. (2014). The CellFlux concept as an alternative solution for sensible heat storage. SolarPaces Conference. Beijing.

Philipp Stuckenbrock, T. S. (2012). Solar combined heat and power supply for a copper mine to increase the copper production efficiency. SolarPaces 2012. Marakesch, Marruecos.

Prieto, C., A., J. y F, R. (2012). Commercial thermal storage. Molten salts vs steam accumulators. SolarPACES 2012. Marrakesch, Marruecos.

Protermo Solar. (2011). Impacto Macroeconómico del sector solar termoeléctrico en España. Madrid: Protermo Solar.

Protermo Solar. (2013). Localización de centrales solares termoélectricas en Espana. Sevilla, España: Protermo Solar.

Querol, P., Olano, J. y Lata, J. (2012). Single tank thermal storage prototype. SolarPACES 2012. Marrakesch, Marruecos.

Roselung, C. (5. 6 2014). Chile's solar market is leading the way in South America. Abgerufen am 7. 25 2014 von www.theguardian.com/global-development-professionals-network/2014/jun/05/chile-renewable-energy-solar-power

SAGEN, SASTELA, DTI. (2013). Assessment of the localisation, industrialistion and job creation potential of CSP infrastructure projects in South Africa. Pretoria, Sudáfrica: GIZ.

Saint-Gobain Thermosolar. (2011). Mirrors for Thermosolar. Abgerufen am 23. 01 2014 von www.saint-gobain-solar-power.com/mirrors-solar-glass-7

Schneider, G., & Maier, H. (2013). Status of the development of a new high temperature energy storage system. SolarPACES 2013. Las Vegas, Estados Unidos.

Schott Solar CSP. (2013). Schott PTR 70 Receiver, the 4th generation. Mainz: Schott Solar CSP.

Singh, H., Saini, R., & Saini, J. (2010). A review on packed bed solar energy storage systems. Renewable and sustainable energy reviews, 14, 1059-1069.

Solargis. (2011). solargis.info. Abgerufen am 20. 01 2014 von http://solargis.info

SQM Europe. (2014). SQM's Thermo-Solar Salts: The natural solution for thermal storage and heat transfer in your CSP plant. Antwerpen: SQM.

Stadelmann, M., Frisari, G., Boyd, R., & Feas, J. (2014). The Role of Public Finance in CSP: Background and Approach to measure its effectiveness. Climate Policy initiative.

Statistisches Bundesamt, Germany. (2013). Daten zur Energiepreisentwicklung. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.

Steinmann, W., & Eck, M. (2006). Buffer Storage for direct steam generation. Solar Energy , S. 1277-1282.

Turchi, C. (2010). Parabolic trough reference plant for cost modeling with the solar advisor model. Golden, EE.UU.: NREL.

Turchi, C., Mehos, M., Ho, C., & Kolb, G. (2010). Current and future costs for parabolic trough and power tower systems in the US market. CO, EE.UU.: National Renewable Energy Laboratory (NREL).

Departamento de Energía de EE.UU. (2013). DSIRE: Database of State Incentives for Renewables & Efficiency. Abgerufen am 28. 1 2014 von www.dsireusa.org

Departamento de Energía de EE.UU. (2013). Loan Programs 1705. Abgerufen am 28. 01 2014 von http://lpo.energy.gov/programs/1705-2/

U.S. Geological Survey. (2012). 2012 Minearls Yearbook - Chile.

Vasters, J., & Sonnenberg, C. (2011). Möglichkeiten deutscher Unternehmen für ein Engagement im chilenischen Rohstoffsektor. Santiago de Chile: AHK Chile.

World steel association. (5. 7 2014). Crude steel production – Junio de 2014. Abgerufen am 15. 7 2014 von www.worldsteel.org

Zunft, S., Hänel, M., & Krüger, M. (2011). Jülich Solar Power Tower - Experimental evalutation of the storage subsystem and performance calculations. Journal of Solar Energy Engineering, S. 1019-1023.