



Accordo di Programma MiSE-ENEA



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO



Studio di sistemi innovativi di accumulo termico

Adio Miliozzi, Giuseppe Mauro Giannuzzi
ENEA, UTRINN-PCI

Workshop - Roma, 27 Maggio 2015



Solare Termodinamico Obiettivo generale



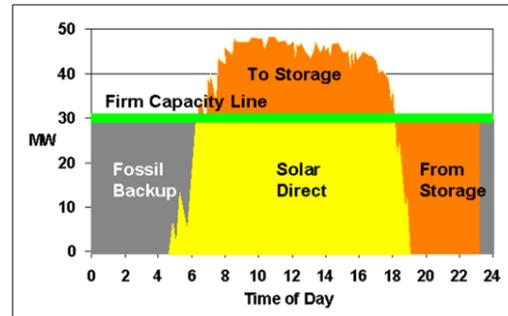
Rendere l'energia solare a concentrazione competitiva con le altre forme di energia
(\$0.21/kWh nel 2010 → \$0.06/kWh nel 2020)

Il Sistema di Accumulo Energia Termica (TES)

Il Sistema TES è una opzione che permette di accumulare energia termica per renderla disponibile in periodi successivi.

Vantaggi:

- stabilizzare la produzione dell'impianto in condizioni di variabilità della sorgente (nuvole, radiazione solare ridotta),
- spostare la produzione in periodi più favorevoli (rispondere a picchi e/o vendere a tariffe più convenienti),
- estendere l'operatività dell'impianto anche in periodi dove il sole è assente (incremento del fattore di utilizzo) senza ricorrere a combustibili fossili
- ridurre le emissioni di CO₂



(calore di processo, energia elettrica)

Sforzo innovativo (obiettivi)

temperature operative
200 - >600 C

efficienze > 95%

costo TES
15-20\$/kWh.

Svantaggi:

- incremento dei costi sia capitale che operativi e di manutenzione

Classificazione dei sistemi di accumulo termico

intervallo di temperatura operativo

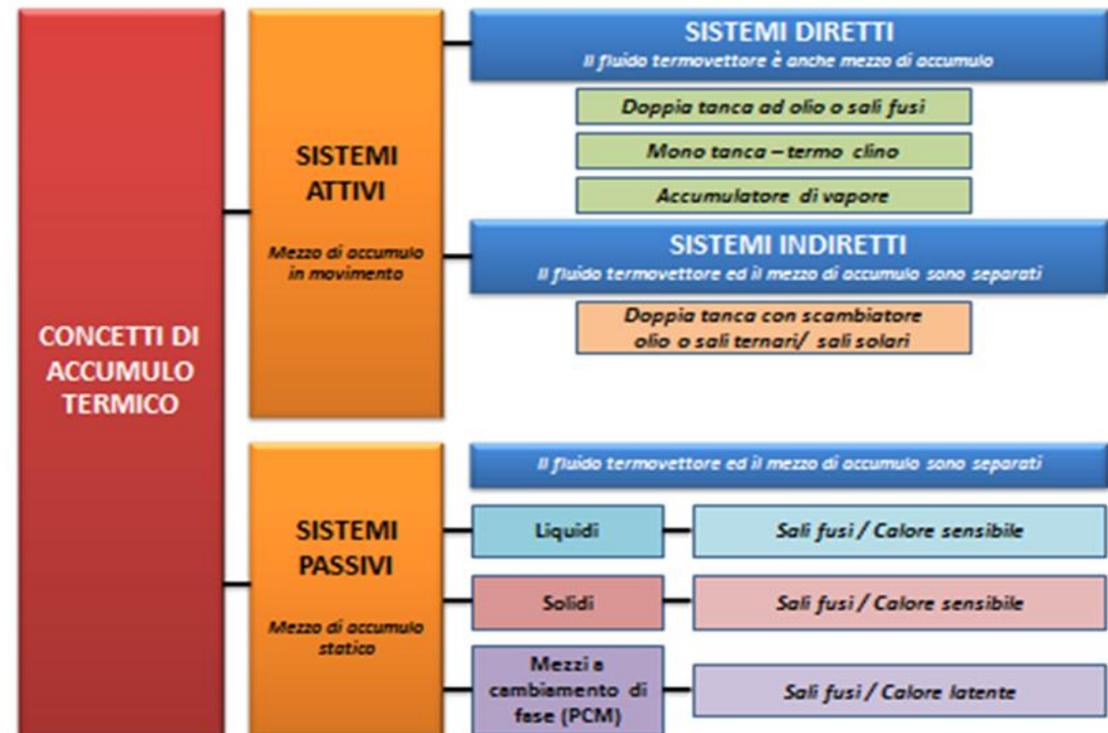
- **HTTES** (*High temperature thermal energy storage*) : oltre i 300°C.
- **MTTES** (*Medium temperature thermal energy storage*) : 150°C- 300°C.
- **LTTES** (*Low temperature thermal energy storage*) : 10°C-150°C.
- **CTES** (*Cold temperature thermal energy storage*) : sotto i 20°C.

Durata dell'accumulo

- breve termine,
- lungo termine
- stagionale.

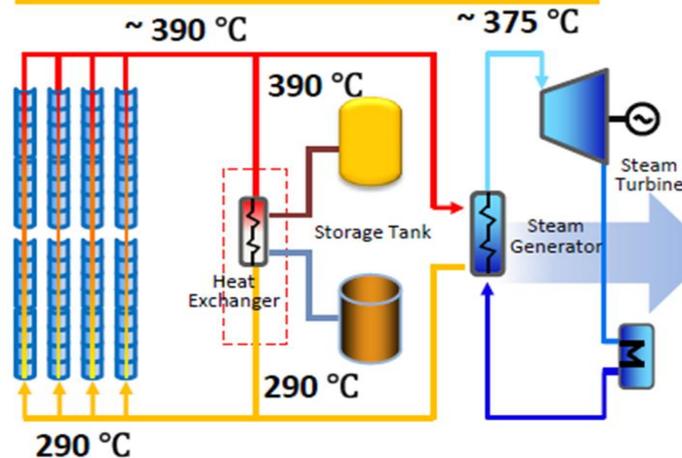
metodo di accumulo di calore:

- ✓ **Calore sensibile (SHTES)**
sono quelli più commerciali e di comune utilizzo. Richiedono grandi volumi, hanno un importante impatto ambientale e costi elevati.
- ✓ **Calore latente (LHTES)**
elevata densità di energia accumulata, ridotte dimensioni e costi. Necessita di ricerca per risolvere alcune problematiche come ad esempio la bassa diffusività termica dei materiali di accumulo. Buone prospettive nel medio-breve periodo.
- ✓ **Termochimico (TCES)**
i valori più elevati di densità energia accumulata, in fase di ricerca iniziale. Competitivi nel lungo periodo.



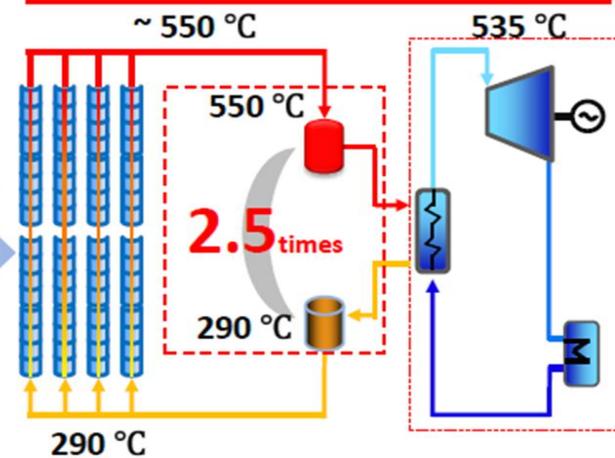
L'accumulo termico nella tecnologia ENEA

Schema impianto CSP a olio e sali fusi



- Fluido termovettore : olio diatermico
- Mezzo di accumulo : sali fusi
- Temp. Oper. Min-Max: 290-390 C
- Salto termico : 100 C
- TES: attivo, indiretto, calore sensibile, a doppio serbatoio con scambiatore

Schema impianto CSP a sali fusi - ENEA (2001)



- Fluido termovettore : sali fusi
- Mezzo di accumulo : sali fusi
- Temp. Oper. Min-Max: 290-550 C
- Salto termico : 260 C
- TES: attivo, diretto, calore sensibile, a doppio serbatoio

Risultati tecnologia ENEA:

- ridurre le dimensioni del sistema di accumulo termico incrementando la differenza di temperatura del ciclo termico;
- eliminare lo scambiatore di calore tra HTF e sistema di accumulo (accumulo di tipo diretto)

Costi del TES

Accumulo indiretto olio-sale solare	60-80 \$/kWh
Accumulo diretto con sale solare	30-40 \$/kWh
Target dichiarato	15-20 \$/kWh (2020)

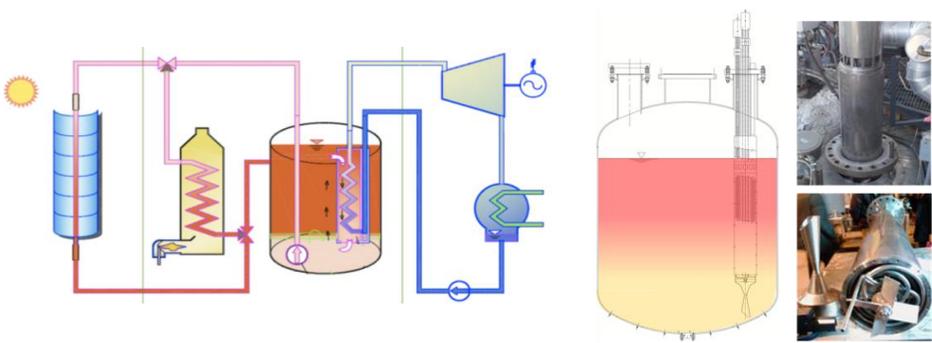
Nuove soluzioni tecnologiche per:

- Ridurre il costo dei componenti
- Ridurre le dimensioni del TES
- Aumentare la densità di energia accumulata

Sistemi di accumulo a Media e Alta Temperatura

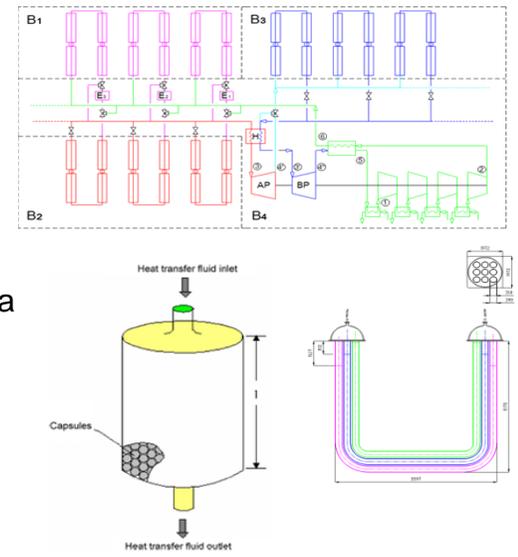
Calore Sensibile
Alta Temperatura (550 C)

Sali fusi : serbatoio unico, GV integrato



Calore Sensibile
Alta Temperatura (550 C)

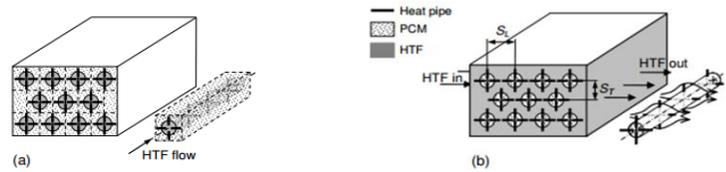
Impianto solare a collettori parabolici lineari con fluido gassoso e accumulo termico a materiale solido.
Ciclo di Brayton.
Accumulo: indiretto, passivo
Mezzo di accumulo: sfere di allumina



Calore Latente
Media Temperatura (150-300 C)

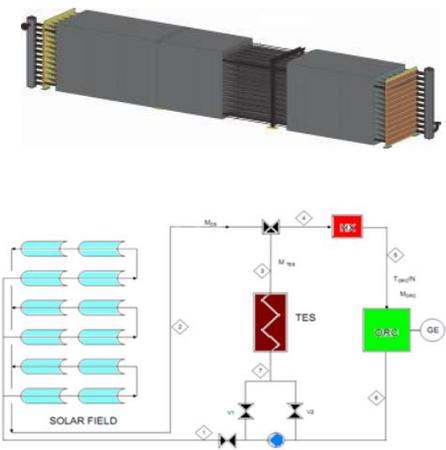
Impianti di piccola taglia in multi-generazione (ORC, Cooling, acqua sanitaria, ...). Calore di processo.
Impianti con olio diatermico, acqua, ...

Mezzo di accumulo: Sali nitrati con nanoparticelle
Elevata densità di energia accumulata



Calore Sensibile
Media Temperatura (150-300 C)

Mezzo di accumulo: cemento
Basso costo del mezzo di accumulo
Possibile incremento della capacità termica tramite PCM



TES a calore latente (LHTES-MTTES)

Sfruttare il calore latente di fusione per aumentare la capacità termica del HSM

1 kg di sali solari, $\Delta T = 100\text{ C}$ \rightarrow 170 kJ di calore sensibile

Se avviene un cambio di fase solido-liquido \rightarrow + 110 KJ di calore latente

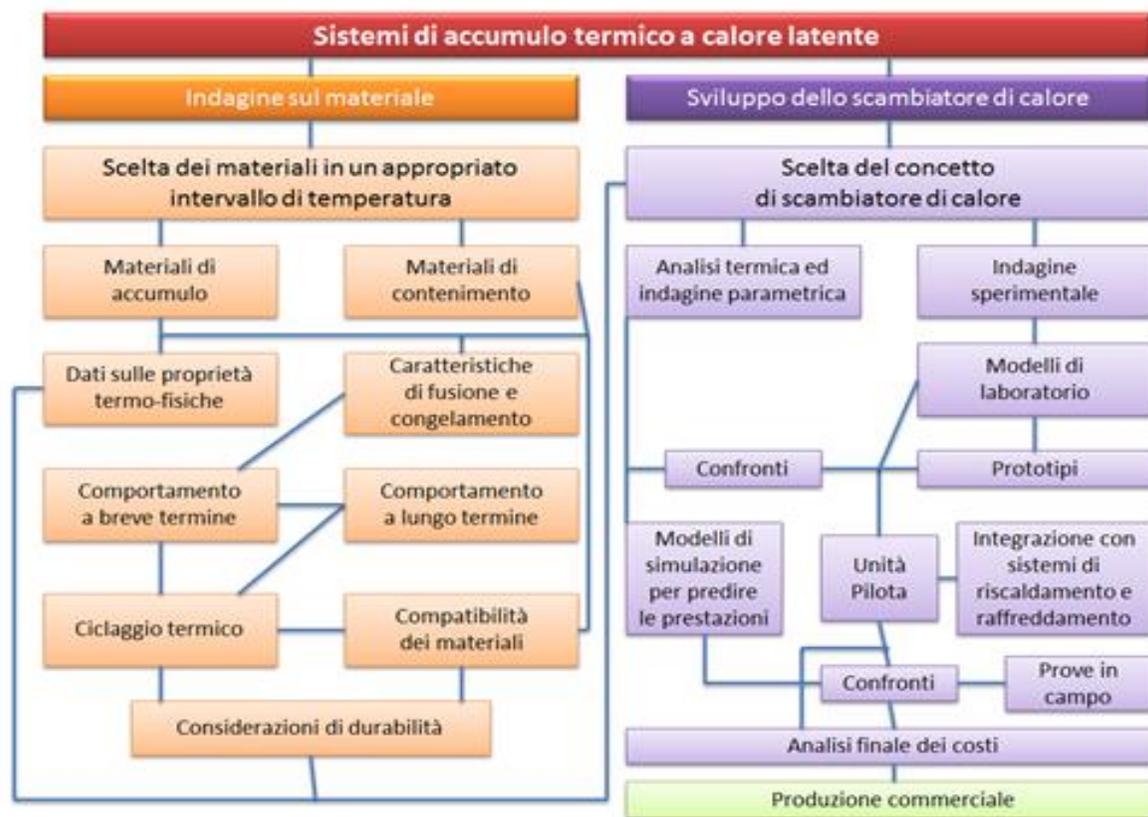
La capacità di accumulo del mezzo è quasi raddoppiata.

LHTES: tipo passivo e indiretto

Tre componenti principali:

- un **mezzo di accumulo** (PCM), la cui temperatura di cambiamento di fase sia in accordo con la temperatura del fluido termovettore;
- un **sistema di contenimento** opportuno, compatibile con il PCM;
- una **superficie di scambio termico** (scambiatore di calore) che garantisca un efficiente trasferimento di calore tra fluido termovettore e PCM e viceversa.

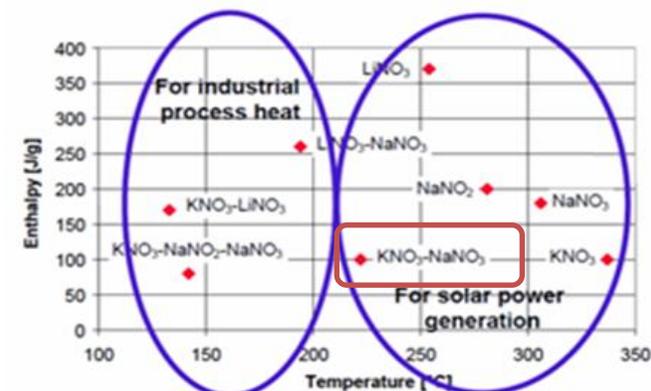
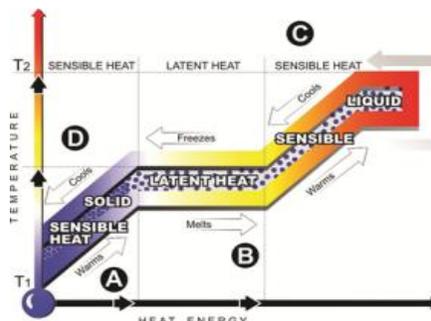
Lo sviluppo di un LHTES passa attraverso lo studio e la progettazione di ciascuno di questi componenti.



LHTES: Materiali a cambiamento di fase (PCM)

Proprietà **termofisiche**, **cinetiche**, **chimiche** ed economiche.

- Temperatura di cambiamento di fase appropriata all'intervallo di temperature desiderato;
- Elevato calore latente per unità di massa;
- Elevato calore specifico;
- Elevata conducibilità termica sia in fase solida che liquida;
- Stabilità (bassa variazione di densità) durante il cambio di fase ;
- Elevata densità;
- Piccole variazioni di volume;
- Bassa pressione di vapore.
- Sotto-raffreddamento limitato od assente durante il congelamento;
- Sufficiente rateo di cristallizzazione.
- Stabilità chimica;
- Nessuna decomposizione chimica;
- Compatibilità con i materiali di contenimento;
- Non velenoso, non infiammabile e non esplosivo.
- Abbondante;
- Disponibile;
- A basso costo.



$\text{KNO}_3\text{-NaNO}_3$ Sali Solari :

Basso costo, Elevata capacità termica, Bassa conducibilità termica

PCM e nanoparticelle (Nano-Fluid PCM – NFPCM)

1-2%wt di particelle con dimensioni nanometriche in un liquido si ottiene un nuovo fluido (detto nanofluido) con proprietà termo fisiche «anomale» superiori a quelle previste dalla normale teoria delle miscele

- un incremento significativo della conducibilità termica e del calore specifico ;
- un trasferimento di calore più efficiente;
- una elevata stabilità alla sedimentazione a causa delle dimensioni e del peso limitati;
- una frizione ed erosione delle superfici dei condotti trascurabili.

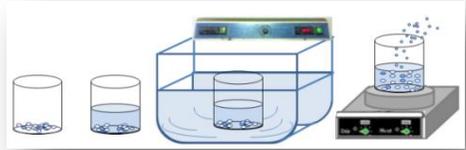


Progetto B.1.3: Energia elettrica da fonte solare

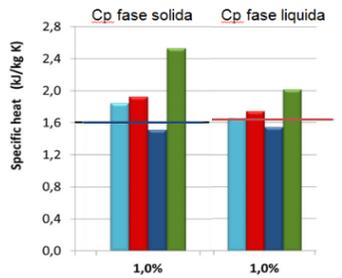
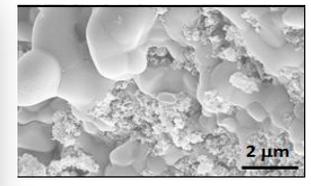
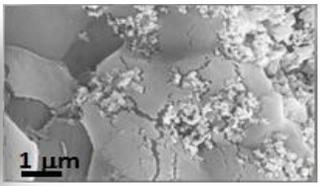
Accumulo termico a calore latente: studio dei materiali

PCM	NFPCM
miscela di sali NaNO ₃ -KNO ₃ (60:40)	Sali + 1% SiO ₂
	Sali + 1% TiO ₂
	Sali + 1% Al ₂ O ₃
	Sali + 1% SiO ₂ -Al ₂ O ₃ (86% silice -14% alumina)

1 metodo:
Miscelazione in soluzione acquosa
Dispersione in bagno ultrasuoni e evaporazione



2 metodo:
Miscelazione ad alta temperatura
Miscelazione in un estrusore bivate co-rotante



NFPCM MIGLIORE : 1wt% SiO₂-Al₂O₃

- Buona dispersione nanoparticelle
- Incremento calore specifico: 57-22% (solido-liquido)
- La T fusione diminuisce di 10°C
- Il calore di fusione ΔH aumenta del 15%

- Buona dispersione a 300°C, 200rpm, 30 min
- Incremento del calore specifico (18-21%)
- Il calore di fusione ΔH aumenta del 2%
- Tempi più brevi per la produzione del nanofluidi

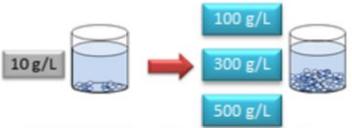
Produzione di NFPCM (SS+1wt.% SiO₂-Al₂O₃) in grandi quantità (15kg per sperimentazione)



1 metodo:
Miscelazione ad alta temperatura



2 metodo:
Miscelazione in soluzione acquosa



Miscelazione con 3 agitatori diversi:

- 1) DISPERMAT
- 2) AGITATORE A PALETTE
- 3) MAGNETIC STIRRER



Metodo 2:

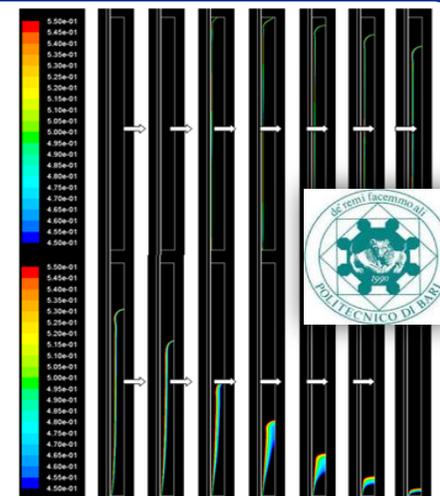
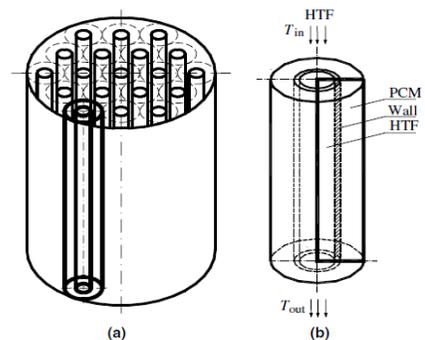
- Aumenta: calore specifico, calore di fusione, conducibilità termica
- Diminuisce la T fusione.
- I risultati sono stati migliori con maggiori quantità prodotte fino a 300g/L.
- Il NFPCM di 100g con AGITATORE (500rpm) ha il maggiore aumento del Cp (29%)

Studio, progettazione e realizzazione di LHTES elementari

Semplice configurazione di tipo “*tube and shell*” in cui il tubo centrale può presentare un sistema di alettatura metallico.

Indagine conoscitiva sui fenomeni in gioco valutare i vantaggi e gli svantaggi

Problema : promozione della conducibilità termica



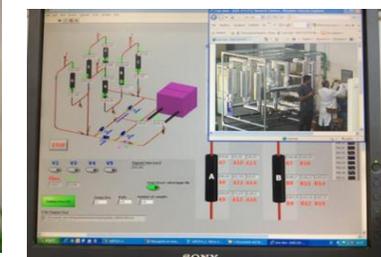
CFD - Fluent

Studio, progettazione e realizzazione impianto ATES

Caratteristiche impianto

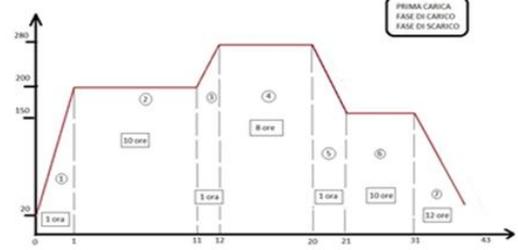
- HTF: olio diatermico Therminol66
- Sistema risc./raffr. Julabo
- T max 300 C - Portata max 10 l/min
- 2 linee di prova - 3 accumulatori in serie
- 9 termocoppie primo accumulatore
- 14 termocoppie lungo il piping
- 1 termocoppia per T parete esterna del TES
- 1 termocoppia per T ambiente
- Un misuratore di portata
- Inversione del flusso e ricircolo (4 elettrovalvole)
- Acquisizione e controllo tramite Labview

ATES (Advanced Thermal Energy Storage)

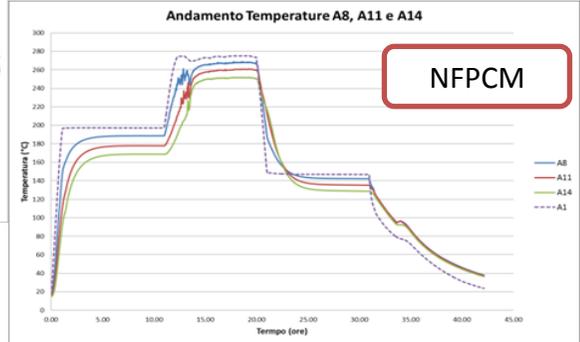
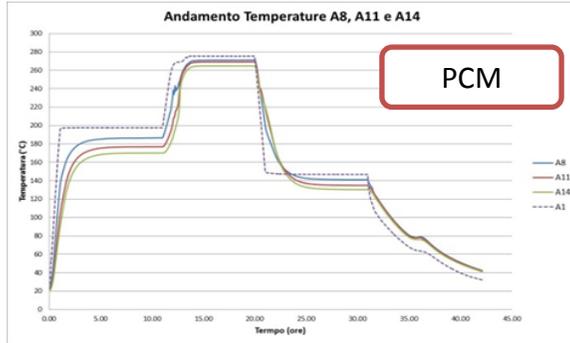


Campagna sperimentale

Tipo Accumulatore	n.	Tubo	Sali solari	Nano particelle	ID Prova	n.
A	3	liscio	si	no	1	3
B	3	alettato	si	no	2	3
C	3	liscio	si	si	3	2
D	3	alettato	si	si	4	2
Totali	12					10



Elaborazione ed analisi dei dati



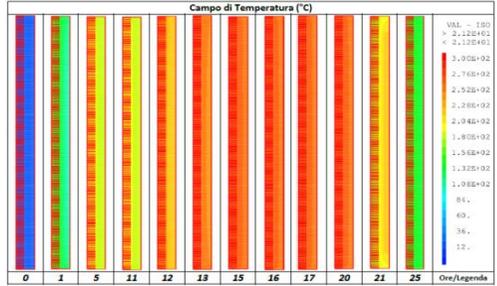
Simulazioni numeriche e confronto numerico-sperimentale



Codice CAST3M (free – CEA Saclay Paris)

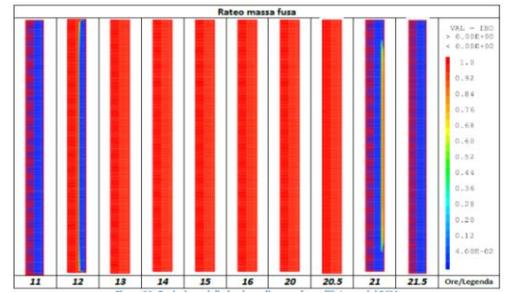
Risorse di calcolo e relativo supporto tecnico
CRESCO/ENEAGRID High Performance Computing (<http://www.cresco.enea.it>)
“CRESCO/ENEAGRID HPC” è finanziato da ENEA e da programmi di ricerca Europei.

Temperature



Analisi FEM 1D, 2D

Fase liquida



Mezzo di Accumulo

PCM

la bassa conducibilità (diffusività) termica è compensata, in fase liquida ed in assenza di limitazioni fisiche (alette), dall'innesco di moti convettivi che facilitano lo scambio termico.

NFPCM

a fronte di una sostanziale invarianza della diffusività termica, risulta incrementata la capacità termica (15-20%) e l'effusività termica.

la fase di carico è lenta (6 ore, +30%): comportamento puramente conduttivo all'interno del liquido, probabilmente dovuto alla maggiore viscosità del mezzo che ostacola l'innesco dei moti convettivi.

Scambiatore

Tubi alettati: è evidente il ruolo di promozione della conducibilità termica esercitato dalle alette, i tempi risultano essere più contenuti e sostanzialmente indipendenti dal mezzo di accumulo;

La fase di carico della prova con tubo liscio e PCM ha tempi confrontabili con quelli dei TES con tubi alettati. Lo scambio termico è prevalente di tipo convettivo

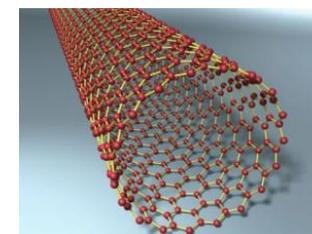
Simulazione FEM

Le analisi (scambio termico puramente conduttivo) non tengono conto degli eventuali fenomeni convettivi nel mezzo di accumulo. Analisi CFD sarebbero più indicate, purché siano correttamente individuati i parametri di calcolo.

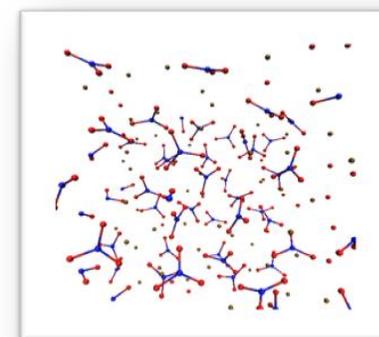
Analisi 1D e 2D : sostanzialmente equivalenti, anche se la seconda è sicuramente più precisa.

Le differenze nei bilanci energetici tra calcolo e sperimentazione sono piuttosto evidenti: superiori perdite verso l'esterno e masse in gioco nella sezione di test.

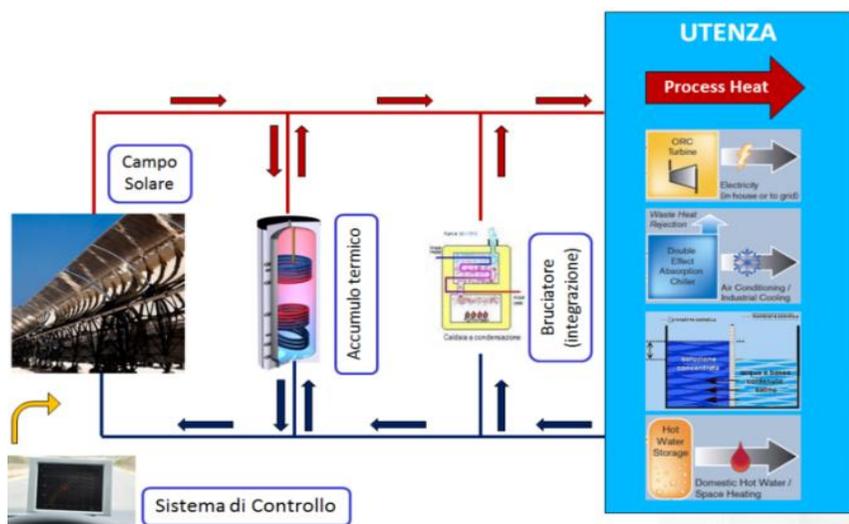
- ❑ Sviluppo di NFPCM con nanoparticelle metalliche e CNTs
- ❑ Sviluppo di cementi con capsule di PCM o NFPCM come mezzo di accumulo termico
- ❑ Analisi di durabilità dei NFPCM (ciclaggio carico-scarico)
- ❑ Simulazione dinamica molecolare: sale e nanoparticelle
- ❑ Sviluppo modelli semplificati per simulare in comportamento del LHTES
- ❑ Sviluppo metodi di analisi per integrazione impianto



Dinamica molecolare



Integrazione d'impianto





Bari, 30 Giugno – 3 Luglio 2013

Effect of nanoparticles on heat capacity of phase change materials based on molten salts for thermal energy storage applications Manila Chieruzzi, Gian Filippo Cerritelli, Adio Miliuzzi, José M. Kenny

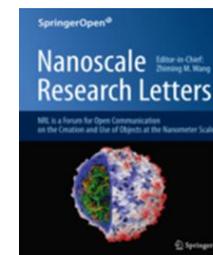


Sevilla, 8–13 Settembre 2013

Phase change materials based on molten salts and nanoparticles for thermal energy storage, Manila Chieruzzi, Gian Filippo Cerritelli, Adio Miliuzzi, José M. Kenny

Nanoscale Research Letters. 10/2013

Effect of nanoparticles on heat capacity of nanofluids based on molten salts as PCM for thermal energy storage, Manila Chieruzzi, Gian F Cerritelli, Adio Miliuzzi and José M Kenny



Venezia, 24-26 Nov. 2014

Use of nanoparticles for enhancing the heat capacity of nanofluids based on molten salts as phase change materials for thermal energy storage
Manila Chieruzzi, Adio Miliuzzi, José M. Kenny

HEFAT2015
Kruger National Park, South Africa
20 - 23 July 2015



20-23 Luglio 2015, South Africa

CFD Analysis of melting process in a shell-and-tube latent heat storage for concentrated solar power plants, S.M. Camporeale, F. Fornarelli, B. Fortunato, L. Magliocchetti, A. Miliuzzi, G. Santo, M. Torresi



Roma, 9-11 Set. 2015

Analisi sperimentale sullo scambio termico in sistemi di accumulo passivi a calore latente utilizzando sali fusi per applicazioni in impianti solari a concentrazione.
R. Liberatore, A. Miliuzzi, T. Crescenzi, E. Veca

Submitted to Nanoscale Research Letters

A new phase change material based on potassium nitrate salt with silica and alumina nanoparticles for thermal energy storage
M. Chieruzzi, A. Miliuzzi, José M. Kenny



2013 SOLTECA: Studio concettuale e sperimentale di un modulo di accumulo termico per impianti solari termodinamici. (UNITN-UNIPD)

Fin. CARITRO

2011 ELIOSLAB-OR4: Progettazione di massima di un serbatoio conico per sali fusi a 550 °C . (ITALCEMENTI-UNIPD)

Fin. Legge 297/99 Art. 12 – Ricerca MIUR

2002 UpTun: Improving The Level Of Fire Safety In Existing Tunnels (ITALCEMENTI-UNIPD-POLIMI)

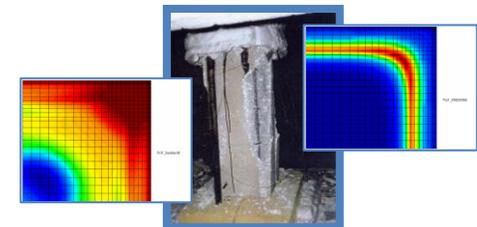
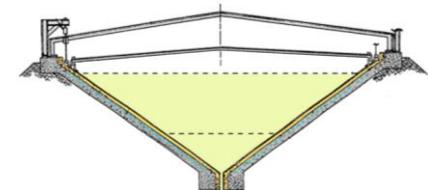
Fin. UE 5th FWP

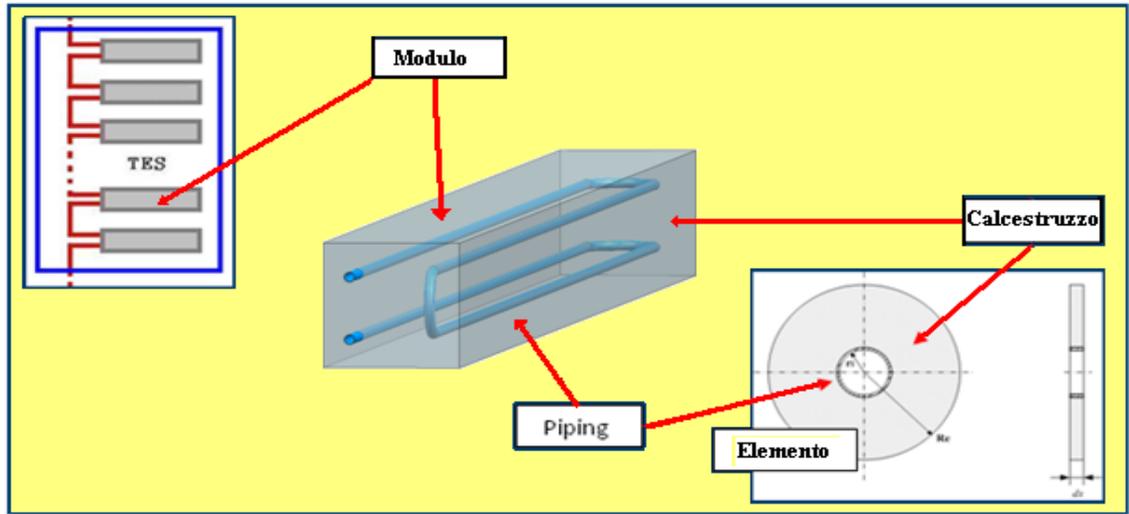
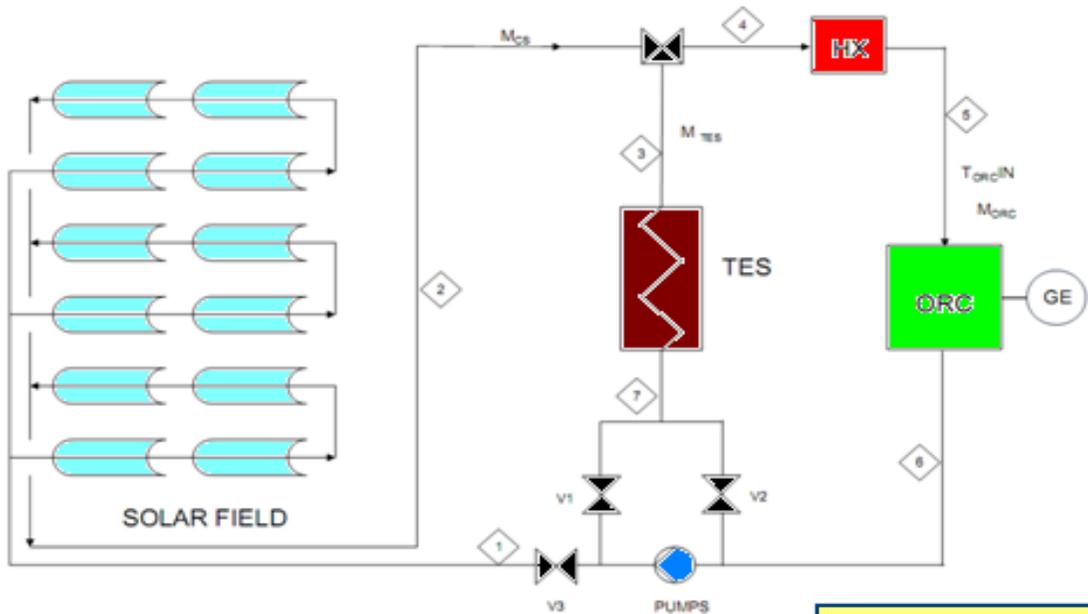
1999 HITECO: Understanding and industrial applications of high performance concretes in high temperatures environment (UNIPD-POLIMI)

Fin. UE FP4

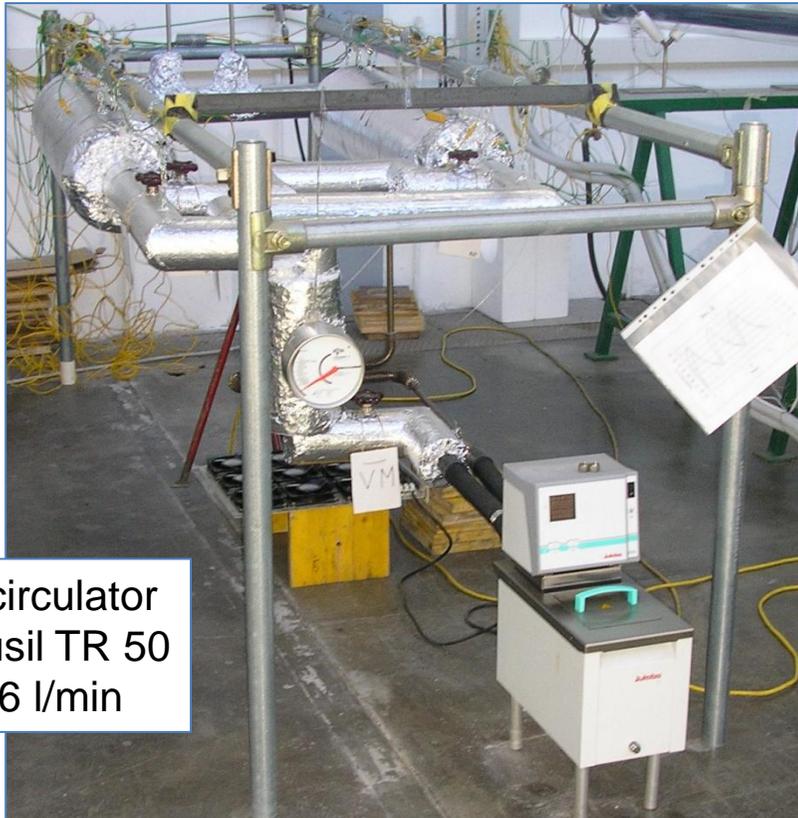
1995 FISA- EU Research on severe accidents: High Resistance concrete behaviour under low velocity impacts and extreme temperature (PENLY) (UNIPD-POLIMI)

Fin- EU Council Decision 91/626 Euratom



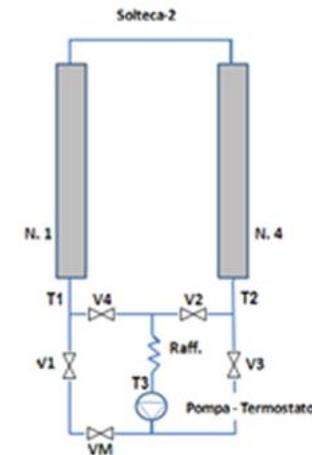


Sperimentazione di un elemento di accumulo termico: PAR 2013



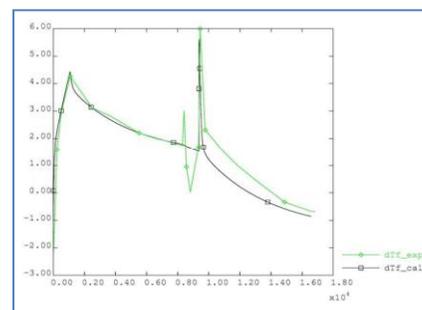
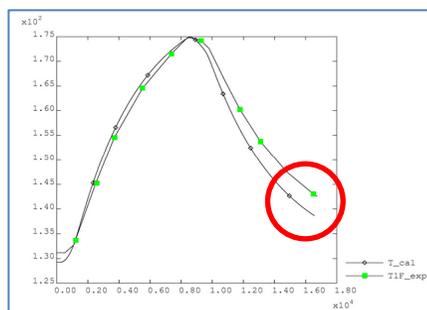
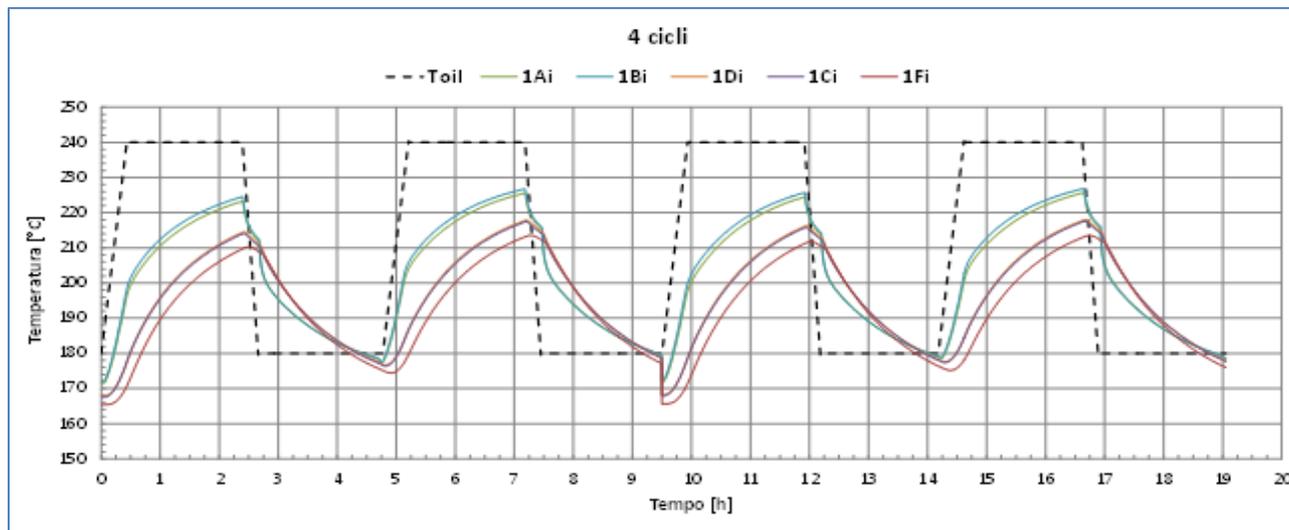
Julabo heating circulator
Silicone Oil : Alusil TR 50
Max: 250 C/ - 26 l/min

- Mescola a conducibilità migliorata
- Lunghezza elemento 1 m



Università di Padova, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale
Università di Trento, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale e Meccanica

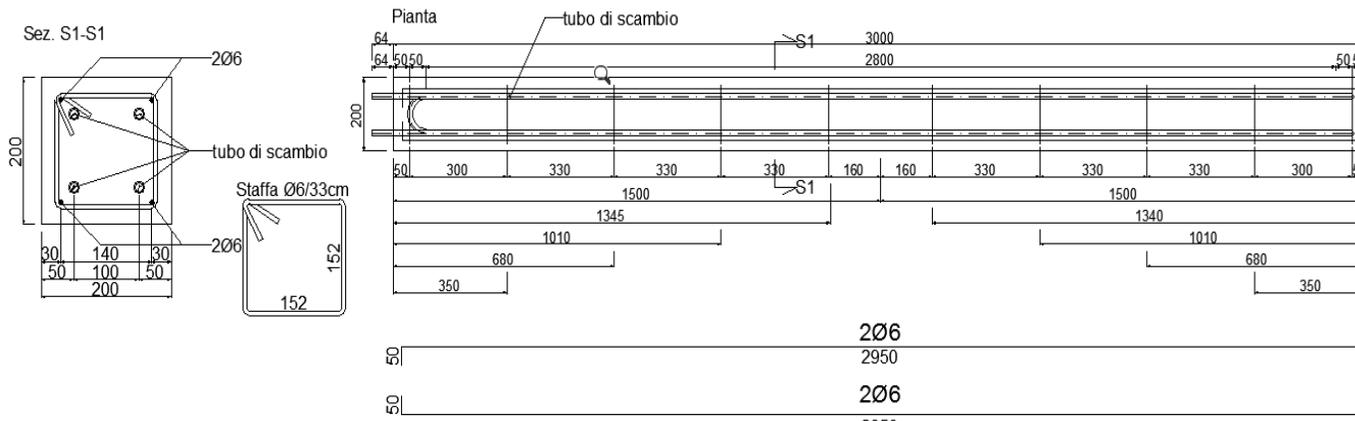
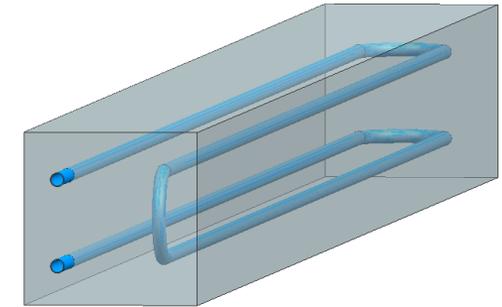
Sperimentazione di un elemento di accumulo termico: PAR 2013



Attività in corso

Si è sviluppato e verrà testato un nuovo prototipo di modulo di accumulo di calore di maggiori dimensioni e con struttura simile a quella prevista per applicazioni industriali.

E' stato effettuato il dimensionamento strutturale e termoidraulico del modulo.



AISI 304

L: 12 m

D: 14 mm

Peso: 300 kg

En.Ac. 6,4 kWh

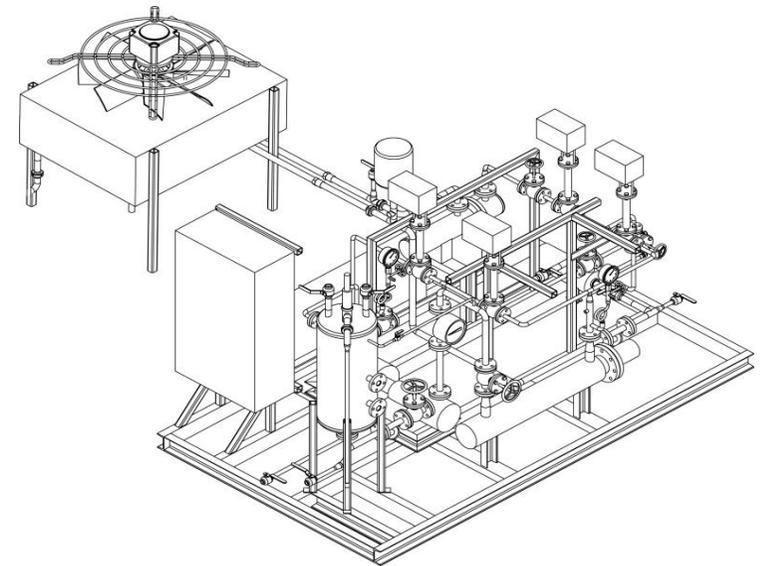
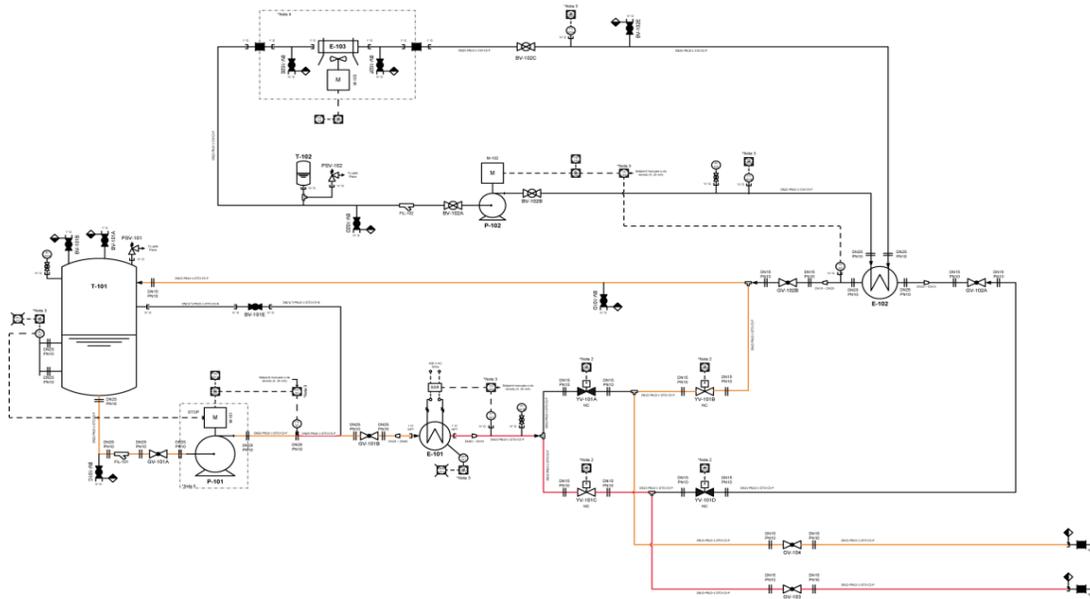
Cost. 18 €/kWh

È in corso la realizzazione di due moduli identici, utilizzando mix differenti di calcestruzzo, uno sviluppato autonomamente dall'Italcementi, l'altro sviluppato dall'Università di Trento (UNITN) nell'ambito del PAR 2013.

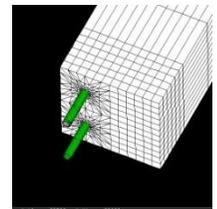
Università di Padova
Università di Trento
Italcementi

Attività in corso

Per la sperimentazione è stato progettato e realizzato un circuito in grado di operare alle temperature attese (~300 C), con potenza termica massima di circa 21 kW. La sperimentazione verrà effettuata presso i laboratori della Casaccia.



La sperimentazione sarà affiancata da un'attività di simulazione numerica, svolta prevalentemente dall'Università di Padova, mediante la quale verranno messi a punto opportuni modelli di calcolo al fine non solo di analizzare il comportamento termico del modulo, ma anche di evidenziare eventuali criticità e degrado funzionale e/o strutturale dei moduli stessi.



- **Tesi ENEA-Università di Roma La Sapienza, 2012.** *“Studio ed analisi di sistemi di accumulo termico in materiali cementizi per impianti solari a concentrazione di piccolo taglia”*. Michele Santoro.
- **INTECH, “Engineering application of Solar Energy”**, Chapter 6: *“Conceptual Study of a Thermal Storage Module for Solar Power Plants with Parabolic Trough Concentrators”*, V. A. Salomoni, C. E. Majorana, G.M. Giannuzzi, R. Di Maggio, F. Girardi, D. Mele and M. Lucentini
- **Materials and Design** 51 (2013) 989-997 – *“Effect of nylon fibres on mechanical and thermal properties of hardened concrete for energy storage systems”*, O. B. Ozger, F. Girardi, G.M. Giannuzzi, V.A. Salomoni, C. E. Majorana, L. Fambri, N. Baldassino, R. Di Maggio.
- **Solar Energy** 103 (2014) 303-315 – *“Thermal storage of sensible heat using concrete modules in solar power plants”*. V.A. Salomoni, C. E. Majorana, G.M. Giannuzzi, A. Miliozzi, R. Di Maggio, F. Girardi, D. Mele, M. Lucentini.

Grazie per l'attenzione



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia
e lo sviluppo economico sostenibile

