

Solare a concentrazione: R&S sul tubo ricevitore

ANTONIO DE LUCA,
ALESSANDRO ANTONAIA

ENEA
Grande Progetto Solare
Termodinamico

studi & ricerche

L'efficienza della tecnologia solare a collettori parabolici lineari sviluppata da ENEA dipende dall'efficienza ottica del collettore e dalla capacità del tubo ricevitore di assorbire l'energia concentrata dagli specchi parabolici. Nei Centri ENEA di Casaccia e Portici, in collaborazione con alcune aziende italiane, si stanno sviluppando soluzioni innovative per favorire la produzione industriale di un tubo ricevitore ad alta efficienza, per temperature di esercizio di 580 °C

Concentrating solar power: tube receiver's R&D

Abstract

The ENEA's technology on parabolic trough depends on the optical efficiency of the collector and on the tube receiver's capacity to absorb the energy concentrated by the parabolic mirrors. Innovative solutions are being developed at ENEA's Casaccia and Portici Centres, in collaboration with Italian companies, with the aim of encouraging industrial production of high-efficiency receiver tubes that can operate at temperature as high as 580 °C. This article presents the results of the R&D phase of the project and some of the data obtained during the experimental activity conducted at the Casaccia Centre's Solar Collectors Test Plant

L'impegno ENEA nel solare a concentrazione

Il duplice vantaggio nell'uso dell'energia solare è di contenere il consumo dei combustibili fossili, riducendo nel contempo le emissioni in atmosfera dei gas prodotti dalla combustione. Nelle regioni del pianeta con alta densità di potenza solare, tipicamente la fascia tropicale, l'utilizzo di questa fonte di energia consente di ottenere annualmente, per ogni metro quadrato di superficie, un'energia termica equivalente alla combustione di un barile di petrolio, evitando il rilascio in atmosfera di circa cinque quintali di anidride carbonica. Appare quindi necessario ed economicamente vantaggioso, visto il costante aumento del prezzo del petrolio, utilizzare questa inesauribile fonte di energia per rispettare l'ambiente e contenere i costi sempre crescenti dello sviluppo industriale mondiale.

Gli impianti solari termici sfruttano l'energia solare per produrre il calore da utilizzare nei processi industriali o nella produzione di energia elettrica. Quest'ultima è la forma più pregiata di energia, che per essere ottenuta da fonte solare con una buona efficienza, richiede la realizzazione di un sistema di accumulo di energia termica ad alta temperatura. Per ovviare alla parziale disponibilità di energia solare nell'arco della giornata, il calore deve essere accumulato in serbatoi di volume opportuno, che ne assicurano la disponibilità anche di notte, rendendo l'utilizzo del calore più flessibile e rispondente alle esigenze dei processi produttivi. Nei periodi in cui il calore accumulato non è sufficiente a coprire la domanda, si può integrare la produzione utilizzando combustibili fossili (olio e gas naturale).

L'assorbimento di energia è ottenuto concentrando l'energia solare con un sistema ottico, il *concentratore*, che

riflette la radiazione sulla superficie del *tubo ricevitore*, dove viene assorbita sotto forma di calore. Durante il giorno il concentratore segue costantemente la traiettoria del sole, concentrando la radiazione sulla superficie del tubo assorbitore, che ha il compito di trasferirla ad un fluido ad alta capacità termica che scorre nel suo interno.

Il calore assorbito può essere impiegato nella produzione industriale, nella desalinizzazione dell'acqua di mare o nella produzione di idrogeno, ma allo stato attuale, l'obiettivo principale degli impianti solari a concentrazione è la generazione di energia elettrica, dove il calore ad alta temperatura viene utilizzato in cicli termodinamici convenzionali con turbine a vapore. In relazione alla geometria e al posizionamento del concentratore rispetto al ricevitore, si possono avere diverse tipologie di impianto solare.

La tecnologia scelta da ENEA (vedi figura 1) è quella dei collettori parabolico-lineari, caratterizzati dal fatto che la superficie riflettente segue la traiettoria del sole ruotando su un solo asse. Il concentratore è fissato ad una struttura di supporto d'acciaio, sufficientemente rigida per avere una buona efficienza di concentrazione in condizioni di esercizio e in grado di resistere sotto l'azione del vento e degli altri agenti atmosferici.

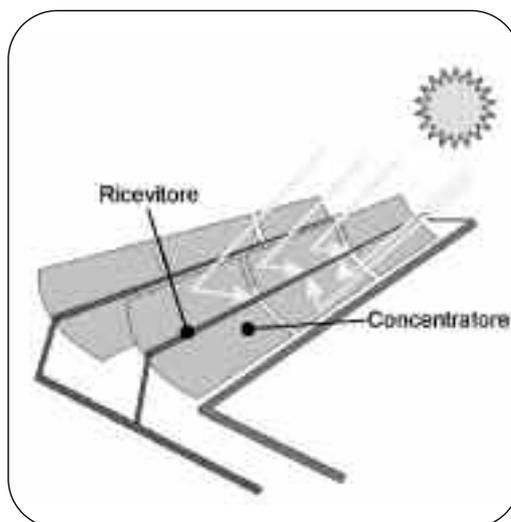


Figura 1
Schema di impianto a collettori parabolico-lineari
Fonte: ENEA

La radiazione solare viene focalizzata su una linea di *tubi assorbitori* posizionati lungo la linea focale del concentratore parabolico. L'efficienza di questa tecnologia a produrre calore ad alta temperatura dipende dal rendimento ottico del concentratore (precisione nella fabbricazione della struttura e dei pannelli riflettenti) e dal rendimento di conversione del *tubo ricevitore*, che deve essere in grado di assorbire la massima energia possibile, con le minime dispersioni termiche per irraggiamento verso l'ambiente esterno.

La temperatura massima di funzionamento del tubo ricevitore dipende essenzialmente dal fluido termovettore che viene utilizzato. La scelta della miscela di sali fusi 60% NaNO_3 , 40% KNO_3 , è legata all'elevata capacità termica di questo fluido (elevate densità e calore specifico), ottima stabilità chimica ad alta temperatura, basso costo, nessun rischio ambientale e semplicità di gestione.

Le innovazioni introdotte da ENEA e sulle quali l'Ente in questi ultimi anni ha concentrato le attività di R&S riguardano:

-L'utilizzo di un *concentratore* a basso costo e di un *tubo ricevitore* innovativo, per concentrare e accumulare in modo efficiente l'energia solare ad alta temperatura

Figura 2
Foto di un tubo ricevitore ENEA con indicazione dei vari componenti



-La presenza di un sistema di accumulo termico per una centrale di potenza, in grado di compensare efficacemente la variabilità della fonte solare

Il sistema d'accumulo prevede due serbatoi di stoccaggio del fluido termovettore: uno caldo a 550 °C ed uno freddo a 290 °C (superiore alla temperatura di solidificazione dei sali).

Dell'attività di R&S finora svolta nel solare a concentrazione (che ha prodotto complessivamente 8 brevetti e che è stata illustrata nei numeri 5/2005 e 1/2006 di *Energia, Ambiente e Innovazione*), in questo articolo vengono descritte sinteticamente le attività che riguardano la fabbricazione e la sperimentazione del tubo ricevitore.

Per una illustrazione complessiva dell'attività del Grande Progetto Solare Termodinamico si può consultare "Il Programma ENEA sull'energia solare a concentrazione ad alta temperatura" all'indirizzo: <http://www.enea.it/com/solar/doc/csp.pdf>

Caratteristiche del tubo ricevitore

Il tubo ricevitore è l'elemento del collettore solare parabolico-lineare che ha la funzione di trasferire al fluido termovettore l'energia concentrata dagli specchi parabolici. I principali componenti che lo costituiscono sono indicati nei punti seguenti e mostrati in figura 2:

- un tubo d'acciaio all'interno del quale circola il fluido e sulla cui superficie esterna è depositato un rivestimento selettivo con elevato coefficiente di assorbimento della radiazione solare;
- un involucro esterno trasparente costituito da un tubo di vetro borosilicato con trattamento antiriflesso, due

giunzioni vetro-metallo e due soffiotti metallici di compensazione delle dilatazioni termiche differenziali tra vetro e acciaio.

Il materiale assorbente depositato sul tubo d'acciaio deve essere spettralmente selettivo, ossia in grado di assorbire la massima quantità di radiazione nello spettro solare e di emettere la minima quantità di calore per irraggiamento nello spettro dell'infrarosso.

Per aumentare l'efficienza di trasferimento del calore al fluido termovettore è necessario che dopo l'assemblaggio del tubo ricevitore sia effettuato un trattamento di degasaggio dell'intercapedine tra i tubi d'acciaio e di vetro, riscaldando il tubo d'acciaio alla massima temperatura di esercizio ed aspirando i gas e l'aria contenuta nella camera, fino a una pressione assoluta di $1,0 \cdot 10^{-4}$ mbar (vuoto di progetto), in modo da eliminare lo scambio termico per convezione naturale tra i due tubi e quindi aumentare l'efficienza di assorbimento del calore in esercizio.

Un ulteriore aumento dell'energia assorbita (circa il 5 %), può essere ottenuto depositando uno strato di materiale antiriflesso sulle superfici interna ed esterna del tubo di vetro. Questo rivestimento (di tipo ceramico), ha la capacità di aumentare l'energia che attraversa il vetro, minimizzando la radiazione riflessa verso l'esterno.

Per garantire il vuoto di progetto è necessario inserire nell'intercapedine un quantitativo opportuno di materiale getter, capace di assorbire la miscela di gas che si potrebbe formare nell'intercapedine durante il funzionamento.

Un secondo materiale assorbente, molto reattivo con l'aria (getter al Bario), viene depositato sulla superficie interna del tubo di vetro formando una macchia di colore metallico di qualche cm^2 . Quando il tubo perde il vuoto e il getter di mantenimento si satura, la macchia diviene di

colore bianco, indicando visivamente la presenza di aria all'interno dell'intercapedine e la conseguente perdita di efficienza termica del tubo ricevitore.

Fabbricazione e sperimentazione del tubo ricevitore

L'ENEA da qualche anno ha avviato un'intensa attività di ricerca tecnologica sulla fabbricazione e la sperimentazione di tubi ricevitori di energia solare. I risultati più importanti di questa attività sono i seguenti:

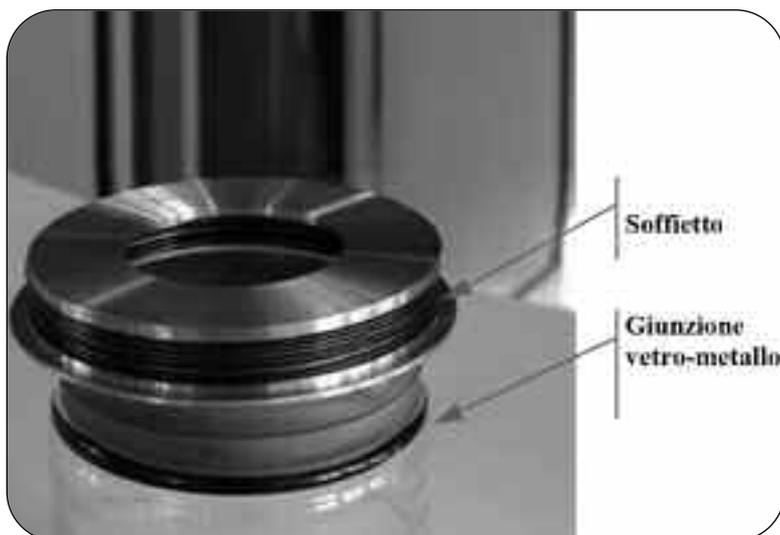
- Ottimizzazione di materiali e processi per la realizzazione di rivestimenti spettralmente selettivi altamente efficienti e stabili ad alta temperatura. Nello sviluppo di questa attività sono stati prodotti 2 brevetti relativi al rivestimento ceramico/metallico (CERMET).
- Ottimizzazione di materiali e processi per la realizzazione del rivestimento esterno trasparente del tubo assorbitore (soffiotti di accoppiamento termo-meccanico ad alto fattore di compensazione delle dilatazioni termiche differenziali tra vetro e acciaio e basso ingombro; giunzione vetro-metallo affidabile alla tenuta del vuoto in esercizio; efficace rivestimento antiriflesso sull'involucro di vetro).
- Progettazione e realizzazione di un impianto pilota di *sputtering*, (dal nome della tecnica di spruzzo) per la deposizione del rivestimento assorbente a base di strati CERMET ad alta efficienza foto-termica su tubi di lunghezza 4 metri.
- Fabbricazione e sperimentazione sull'impianto Prova Collettori Solari (PCS) del Centro Ricerche ENEA Casaccia di una prima serie di tubi ricevitori con rivestimento superficiale al Nero di Cromo e successivamente, sperimentazione di una seconda linea di tubi ricevitori prodotti dalla tedesca SCHOTT (tuttora in corso).

L'impianto pilota di *sputtering* per la deposizione del rivestimento a base di

strati CERMET (figura 3), realizzato in collaborazione con l'industria nazionale su progetto ENEA, è stato installato presso i laboratori del Centro Ricerche ENEA Portici, dove si stanno mettendo a punto i parametri di processo per migliorare le caratteristiche foto-termiche del materiale depositato su tubi di lunghezza 4 m. Dopo questa fase di ottimizzazione del rivestimento che si conclude entro la primavera del 2006, sarà avviata la fabbricazione di una prima serie di 24 tubi ricevitori, che saranno installati sull'impianto PCS per la verifica sperimentale delle caratteristiche foto-termiche e di affidabilità strutturale in esercizio.

Figure 3 e 4

Sopra, foto dell'Impianto pilota di sputtering presso il Centro ENEA di Portici. Sotto, foto della saldatura della giunzione vetro-metallo al soffierto



La fase successiva sarà l'industrializzazione del processo di fabbricazione, che coinvolgerà i partner che in questi anni hanno collaborato allo sviluppo delle tecnologie di fabbricazione e di trattamento termico dei tubi ricevitori.

Alcuni industriali italiani sono disposti ad investire capitale privato per la realizzazione di una fabbrica da gestire attraverso la costituzione di un Consorzio d'impresе. Questi imprenditori hanno iniziato a collaborare con ENEA sin dalla fabbricazione della prima serie di tubi ricevitori, sviluppando competenze sulle tecnologie di lavorazione e sui trattamenti termici da eseguire a valle dell'assemblaggio.

Tra le tecnologie di fabbricazione sviluppate in collaborazione con l'industria, la più importante è quella relativa alla giunzione vetro-metallo, che è una saldatura a tenuta di vuoto tra due materiali che hanno coefficienti di dilatazione termica molto diversi tra loro. La tecnologia di giunzione è stata messa a punto da un'industria italiana che per circa un anno ha svolto ricerca tecnologica solo su questo processo (in Europa solo la SCHOTT è in grado di produrre la giunzione su scala industriale). Nella figura 4 è mostrato un campione di giunzione vetro-metallo, saldato al soffierto di compensazione della dilatazioni termiche che sarà utilizzato per la fabbricazione dei prossimi tubi ricevitori ENEA.

Parallelamente allo sviluppo del processo di fabbricazione è stata avviata l'attività sperimentale sull'impianto PCS, prevista sia su tubi ENEA sia su tubi commerciali (per avere un riscontro sperimentale sulle caratteristiche foto-termiche e di affidabilità strutturale dei tubi ricevitori disponibili sul mercato).

Sul mercato internazionale le aziende produttrici di tubi ricevitori per collettori solari parabolico-lineari, sono

la israeliana SOLEL e la tedesca SCHOTT. Fino a qualche mese fa non era possibile acquistare tubi ricevitori SOLEL, perché la politica commerciale della società era quella di vendere l'intero collettore solare (specchi parabolici e tubi ricevitori), per cui non è stato possibile avere a disposizione questi tubi. Attualmente sembra che SOLEL voglia cambiare filosofia, ma il programma di ricerca ENEA in questo momento è in una fase di sviluppo molto avanzata ed è orientato verso la fabbricazione e la sperimentazione di un tubo ricevitore fabbricato in Italia. Con la SCHOTT è stata avviata una collaborazione che ha permesso di realizzare la campagna sperimentale attualmente in corso, con l'obiettivo di valutare le caratteristiche foto-termiche e meccaniche dei tubi ricevitori tedeschi e di verificare l'entità della degradazione del rivestimento SCHOTT in funzione del tempo e della temperatura di esercizio. Tra i componenti realizzati presso i laboratori ENEA per la sperimentazione dei tubi SCHOTT, oltre ai supporti di bloccaggio dei tubi ricevitori e agli schermi di protezione delle giunzioni vetro-metallo, ci sono stati anche gli isolatori elettrici e i tratti di tubazione strumentati con termocoppie per la misura della temperatura del fluido termovettore.

Caratteristiche foto-termiche del CERMET ENEA

Per ottenere un rivestimento superficiale che ad alta temperatura abbia una elevata efficienza di assorbimento del calore, un basso valore di emissività e caratteristiche chimico-fisiche stabili nel tempo, è necessario sviluppare un materiale otticamente selettivo costituito da strati CERMET con opportuno rapporto di concentrazione metallo/ceramico. Il progetto termo-mecca-

nico del tubo ricevitore ENEA prevede una temperatura massima del fluido termovettore di 550 °C, che corrisponde a una temperatura massima della superficie del tubo d'acciaio di circa 580 °C.

Per garantire queste prestazioni, presso i laboratori ENEA di Portici è stato realizzato un materiale spettralmente selettivo, in grado di mantenere pressoché inalterata nel tempo la proprietà di assorbire la maggior parte dell'energia solare incidente e di emettere la minore quantità possibile di energia per irraggiamento. I parametri foto-termici di questo materiale, determinati da analisi di caratterizzazione ottica sono i seguenti:

- alta efficienza foto-termica, ossia alta assorbanza solare (> 94%) e bassa emissività (< 14%), fino alla temperatura 580 °C;
- alta stabilità chimica e strutturale fino alla temperatura di 580 °C.

È opportuno sottolineare che sia i tubi SOLEL sia i tubi SCHOTT sono prodotti per collettori solari parabolico-lineari che come fluido termovettore utilizzano olio diatermico, con temperature massime di esercizio di circa 400 °C e che, quindi, non hanno le caratteristiche ideali per funzionare alla temperatura di riferimento del progetto ENEA. Le caratteristiche foto-termiche del rivestimento SOLEL (95% di assorbanza solare, 9% di emissività a 400 °C e 14,5% di emissività a 580 °C), sono abbastanza vicine a quelle del CERMET ENEA, ma prove di laboratorio hanno mostrato che a 580 °C e per valori di vuoto non molto spinti, le proprietà foto-termiche del rivestimento SOLEL subiscono una degradazione che si manifesta in un indesiderato incremento del valore di emissività.

I valori forniti dalla SCHOTT per l'assorbimento solare e l'emissività a 400 °C, sono rispettivamente 95% e 14%.

A questa temperatura l'emissività del CERMET SCHOTT è maggiore di quella del CERMET ENEA e a 580 °C sale al 22%. Per quanto riguarda la stabilità nel tempo, la SCHOTT ha dichiarato che le caratteristiche foto-termiche del loro rivestimento sono stabili fino ad una temperatura di esercizio di 500 °C. Considerando l'attuale situazione di mercato, che presenta solo questi due potenziali fornitori e confrontando le caratteristiche tecniche dei prodotti in commercio con quelle del CERMET sviluppato al Centro di Portici, l'obiettivo ENEA in questi ultimi anni è stato quello di completare lo sviluppo della tecnologia di fabbricazione del tubo ricevitore e di realizzare una serie dimostrativa di tubi da provare sull'impianto PCS, per avere la conferma della ripetitività delle caratteristiche foto-termiche su una scala di produzione industriale.

Sperimentazione sull'impianto PCS

Figura 5

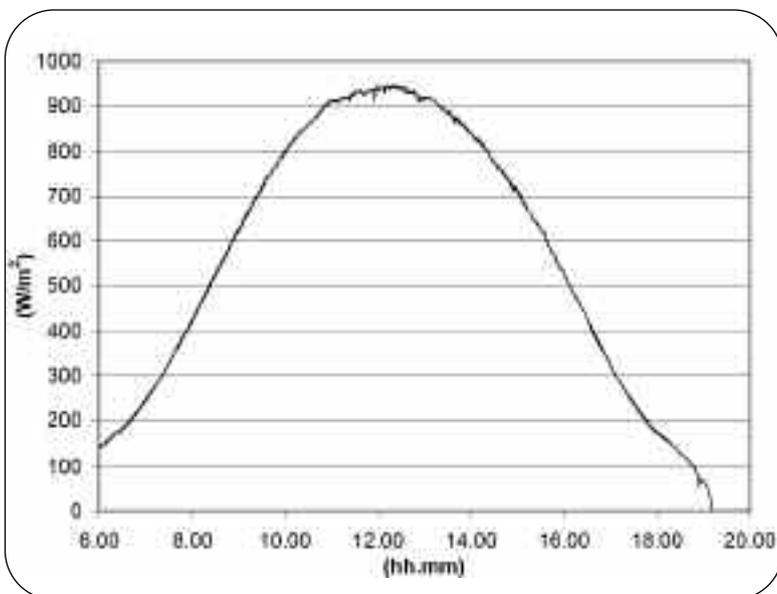
Impianto PCS: distribuzione della densità di potenza al suolo della radiazione solare efficace

Presso l'impianto PCS sono state effettuate due campagne sperimentali, la prima su tubi ricevitori fabbricati da ENEA con rivestimento assorbente in Nero di Cromo, la seconda

ancora in corso, sui tubi SCHOTT. Il Nero di Cromo ha una bassa efficienza foto-termica rispetto al CERMET e quindi non è adatto per la fabbricazione di tubi ricevitori destinati alla produzione di calore ad alta temperatura, ma nonostante ciò, la prima fase di sperimentazione ha avuto l'importante funzione di avviare l'impianto PCS in esercizio, di realizzare un sistema di acquisizione dati efficiente, di individuare le soluzioni tecniche per migliorare l'efficienza e l'affidabilità strutturale dei tubi ricevitori. La sperimentazione sui tubi SCHOTT è la prima campagna di prove effettuata con tubi ricevitori che hanno caratteristiche foto-termiche accettabili ed ha permesso di verificare sperimentalmente le potenzialità di applicazione del solare termodinamico ad alta temperatura per la produzione di energia elettrica.

Nelle figure seguenti è mostrato un esempio dei risultati sperimentali ottenibili in una giornata di esercizio caratterizzata da una buona insolazione (05/08/2005).

La figura 5 mostra la distribuzione della densità di potenza solare diretta, incidente normalmente alla superficie del piano di captazione dei due collettori da 50 metri dell'impianto PCS. La figura 6 mostra gli andamenti nel tempo delle temperature di ingresso e di uscita delle due linee di tubi ricevitori. Il valore massimo della differenza di temperatura tra la sezione d'ingresso del fluido nel primo collettore (con temperatura fissata a 359 °C) e la sezione d'uscita del secondo, si verifica alle 12,15 ed è di circa 41 °C. Le brusche cadute di temperatura nella sezione di uscita del primo collettore e nelle sezioni di ingresso e di uscita del secondo, sono dovute a prove di posizionamento fuori fuoco delle linee di tubi ricevitori.



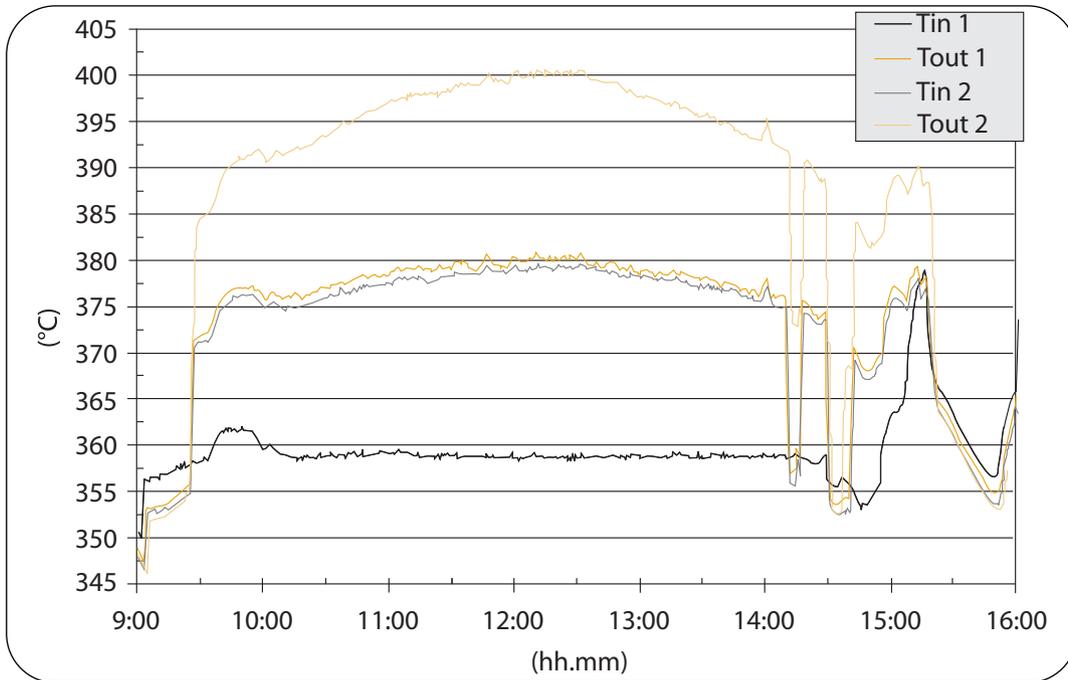


Figura 6
Impianto PCS: temperature di ingresso e uscita del fluido dai due collettori

La figura 7 mostra l'andamento della potenza termica assorbita dal fluido:

$$P = \Gamma c_p (T_{in2} - T_{in1}) \text{ dove,}$$

Γ : portata in massa del fluido termovettore (5,4 kg/s);

$$c_p = c_p(T) = 1443 + 0,172 T \text{ (T in } ^\circ\text{C),}$$

calore specifico del fluido in funzione della temperatura;

T_{in1} : temperatura del fluido nella sezione

di ingresso del primo collettore;

T_{out2} : temperatura del fluido nella sezione di uscita del secondo collettore.

L'area al di sotto della curva di figura 7 rappresenta l'energia termica complessivamente assorbita durante il funzionamento, pari a circa 1380 kWh termici, che corrisponde ad una potenza termica media assorbita dal

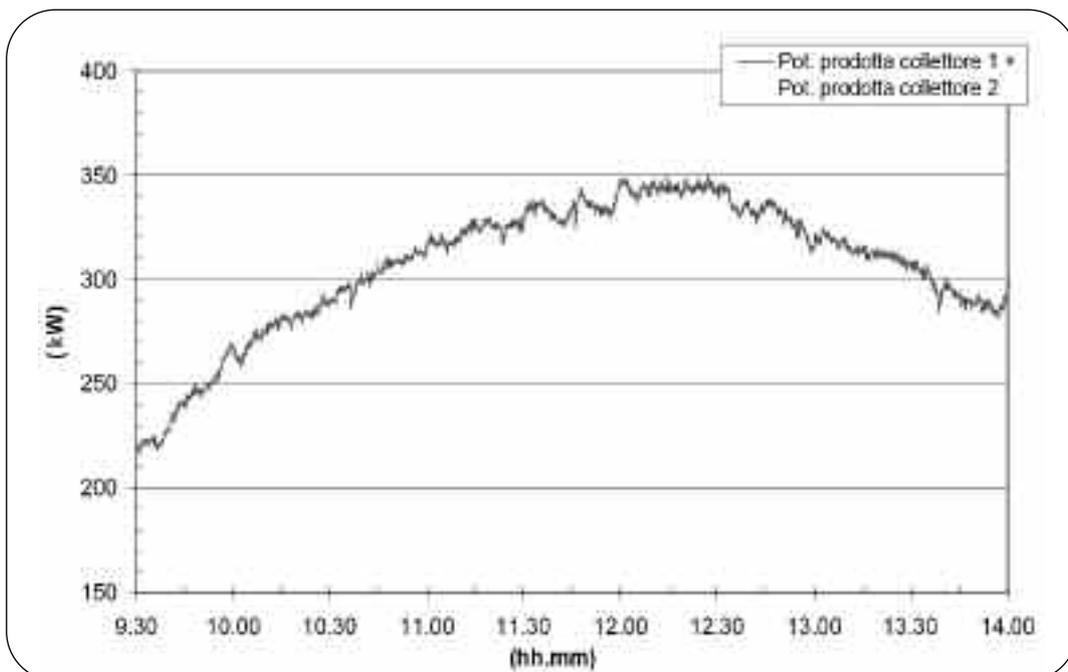
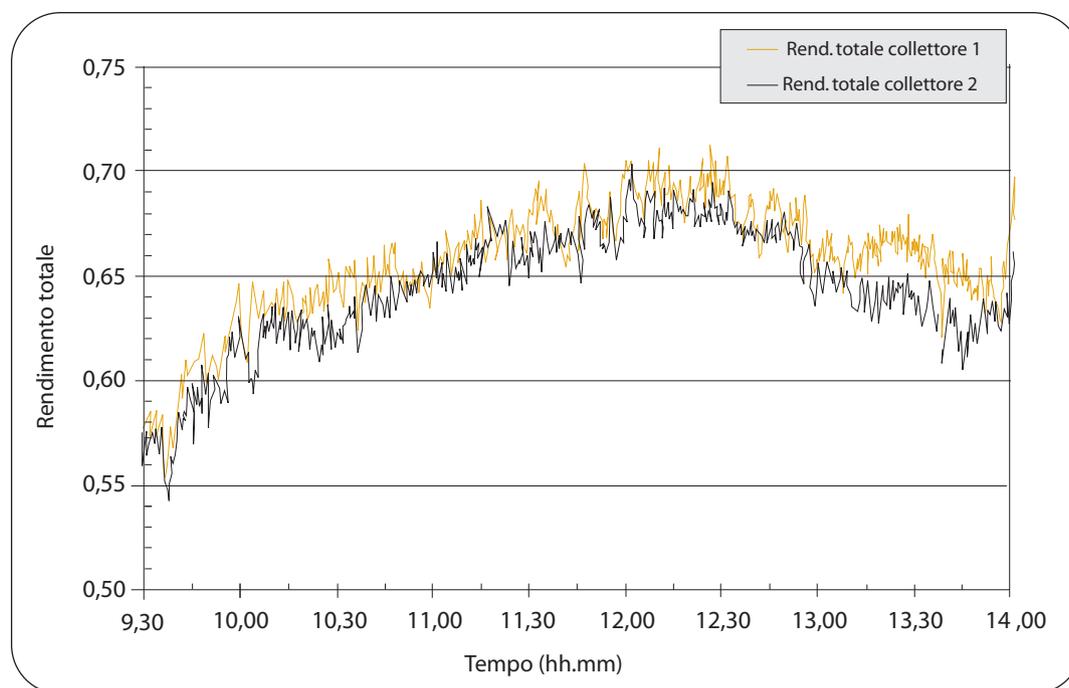


Figura7
Potenza termica prodotta dai due collettori

Figura 8
Rendimento totale
dei due collettori



fluido di circa 307 kW termici. Considerando un rendimento di trasformazione dell'energia termica in energia elettrica del 30%, l'impianto avrebbe prodotto 414 kWh in circa 4,5 ore di funzionamento, con una potenza media di produzione di circa 92 kW elettrici.

Nella figura 8, è mostrato l'andamento del rendimento totale di assorbimento dell'energia solare, dato dal rapporto tra la potenza assorbita dal fluido e la potenza solare diretta incidente normalmente al piano di captazione del collettore. In pratica il rendimento totale è il rateo di energia termica assorbita ad una fissata temperatura di ingresso del fluido e quindi caratterizza complessivamente le prestazioni del collettore in esercizio a quella temperatura.

Il rendimento totale è sempre maggiore al 55%, con un valore massimo del 68÷69 % nel periodo di massimo irraggiamento solare. Questi dati sono molto incoraggianti, soprattutto se si pensa che i tubi ricevitori ENEA di prossima generazione avranno una maggiore efficienza di trasferimento del calore al fluido termovettore rispetto ai tubi SCHOTT.

Conclusioni

Grazie alle favorevoli condizioni di insolazione presenti nel Mezzogiorno, gli impianti solari a concentrazione potrebbero assumere un ruolo non trascurabile nel futuro panorama energetico del nostro Paese.

L'obiettivo finale dell'attività di R&S ENEA è la costruzione e la messa in esercizio di impianti dimostrativi delle tecnologie sviluppate, che ne consentano la diffusione su ampia scala e servano da stimolo per la creazione di un mercato autostostenuto.

La tecnologia ENEA è modulare e può soddisfare esigenze di realizzazione di grandi impianti, in connessione con la rete elettrica nazionale (centinaia di MWe), di piccoli impianti autonomi e di integrazione con le centrali termoelettriche attualmente in esercizio.

Per poter sviluppare componenti innovativi che abbiano prestazioni e costi tali da permettere una diffusione di questa tecnologia su ampia scala, le attività sono condotte in stretta collaborazione con l'industria nazionale, al fine

di completare la fase di R&S individuando le soluzioni migliori per una produzione di serie.

Ma c'è anche un altro aspetto da non sottovalutare, che riguarda l'opportunità di questi partner industriali di entrare nel mercato internazionale dei componenti per la produzione di energia da fonte solare. L'industria in questo modo è stata incentivata ad investire per ottimizzare i sistemi di produzione ed abbattere i costi, con ricadute positive sul futuro del solare a concentrazione. Con tali prospettive l'ENEA ha avviato la collaborazione con diverse aziende nazionali e in particolare per lo sviluppo del tubo ricevitore è importante citare: ITIV (Milano), Steroglass (Perugia),

Saes Getter (Milano); mentre per il progetto e la costruzione della macchina industriale di *sputtering* va citata la Sistec (Gruppo Angelantoni, Perugia). A livello internazionale è stato importante anche il coinvolgimento della SCHOTT, con la quale c'è una buona collaborazione per la sperimentazione di una serie di tubi ricevitori tedeschi sull'impianto PCS e l'interessamento per comuni attività di ricerca su tematiche che riguardano il miglioramento delle prestazioni complessive del tubo ricevitore.

Per informazioni:

antonio.deluca@casaccia.enea.it

Bibliografia

SETARO T., *Attività di ricerca e sviluppo sul sistema ricevitore*, ENEA/SOL/RD/2001/01.

MILIOZZI A. et al., *Comportamento termo-meccanico del tubo assorbitore di un impianto solare. Analisi termica semplificata e termomeccanica*, ENEA/SOL/RD/2001/08.

ANTONAI A. et al., *Risultati preliminari dell'attività di fabbricazione e caratterizzazione di coating spettralmente selettivi*, ENEA/SOL/RD/2001/13.

ANTONAI A., SETARO T., *Aziende interessate alla collaborazione nello sviluppo del coating a basso costo e del sistema ricevitore*, ENEA/SOL/RD/2001/15.

ANTONAI A. et al., *Stato di avanzamento delle attività per lo sviluppo del collettore solare e valutazione economica per coating, sistema ricevitore e concentratore parabolico*, ENEA/SOL/RS/2002/05.

ADDONIZIO M.L. et al., *Caratterizzazione di film spettralmente selettivi a base di Cromo Nero e TiNOX*, ENEA/SOL/RS/2002/13.

ADDONIZIO M.L. et al., *Ottimizzazione di coating spettralmente selettivi su riflettore metallico d'argento*, ENEA/SOL/RS/2002/14.

NICOLINI D., GIANNUZZI G.M., *Valutazione dei carichi agenti sui supporti del sistema ricevitore di un collettore solare parabolico lineare*, ENEA/SOL/RS/2002/16.

ARSUFFI G. et al., *Progetto per un dispositivo di prova per lo studio del sistema di riscaldamento elettrico per tubazioni e tubi ricevitori di impianti solari a collettori parabolici lineari con sali fusi*, ENEA/SOL/RS/2003/05.

ANTONAI A., *Il tubo ricevitore: elementi di valutazione per lo sviluppo del rivestimento selettivo*, ENEA/SOL/RS/2004/04 - RISERVATO.

SETARO T., *Valutazione dei costi e delle possibili strategie per la realizzazione industriale del tubo ricevitore*, ENEA/SOL/RS/2004/05 - RISERVATO.

VIGNOLINI M. et al., *Progetto Archimede: Realizzazione di un impianto solare termodinamico integrativo presso la Centrale ENEL di Priolo Gargallo (SR) - Progetto Preliminare*, ENEA/SOL/RS/2004/15 - RISERVATO.

MONTECCHI M., COLUCCI A., *Misure preliminari del tubo ricevitore con termocamera infrarossa*, ENEA/SOL/RS/2004/18.

CRESCENZI T. et al., *Analisi dei dati sperimentali dell'impianto PCS*, ENEA/SOL/RS/2004/23 - RISERVATO.

MESCHINI F., MONTECCHI M., *Trattamento antiriflesso per il tubo di vetro racchiudente il ricevitore nell'impianto solare termodinamico PCS*, ENEA/SOL/RS/2004/25.

GRENA R., *Analisi dell'efficienza ottica del sistema collettore-ricevitore e della distribuzione della radiazione sul tubo ricevitore*, ENEA/SOL/RS/2005/06.

CRESCENZI T., MAZZEI D., *Caratterizzazione termica tubi ricevitori Schott*, ENEA/SOL/RS/2005/15.

RUSO V., *Analisi dei dati sperimentali provenienti dalle prove su un tubo Schott*, ENEA/SOL/RS/2005/17.

DE LUCA A., RUSO V., *Modello di scambio termico allo stato stazionario e transitorio del tubo ricevitore*, ENEA/SOL/RS/2005/20.

FALCHETTA M., MONACI P., *Il Programma ENEA sull'energia solare a concentrazione*, ENEA/SOL/RS/2005/22.

DE LUCA A. et al., *Valutazione su alcuni aspetti specifici del comportamento termico e meccanico dei tubi Schott*, ENEA/SOL/RS/2006/10 - RISERVATO.

NICOLINI D., *Studio della modellizzazione di un soffietto commerciale con il codice di calcolo agli elementi finiti Cast3M*, ENEA/SOL/RS/2006/11 - RISERVATO.