



Solare a concentrazione: ottenere energia dalla luce solare in modo sostenibile e rinnovabile

La radiazione solare che irraggia la Terra è una straordinaria fonte di energia sostenibile e rinnovabile. Nel solare a concentrazione, mediante specchi, la luce solare è focalizzata in un'area ridotta ove è posto un ricevitore per la conversione dell'energia luminosa in energia termica accumulabile. L'ENEA ha sviluppato la tecnologia Italiana per sistemi parabolici-lineari e si è dotata delle apparecchiature necessarie alla caratterizzazione dei componenti. L'articolo ne descrive alcune di natura prettamente ottica

DOI 10.12910/EAI2015-098

■ M. Montecchi

Introduzione

Il pianeta Terra è costantemente irraggiato dalla luce emessa dalla stella a lui più vicina: il Sole. La vita e molte tra le forme di energia utilizzate oggi dall'uomo (petrolio incluso) discendono più o meno direttamente dalla luce solare. Senza il Sole la Terra sarebbe buia, immota e congelata. Ciò nonostante solo recentemente, a causa di ripetute crisi economiche e petrolifere, si è prestata attenzione alle tecnologie atte a ottenere energia dalla luce solare.

La tecnologia più semplice, ma non per questo meno rilevante, è quella dei pannelli termici per la generazione di acqua calda; in sostituzione di boiler elettrici e caldaie a gas, l'adozione diffusa dei pannelli termici consente di ridurre il fabbisogno di energia elettrica e di idrocarburi.

Una tecnologia più complessa è quella dei pannelli fotovoltaici (Photovoltaic, PV) che generano corrente

elettrica a partire dalla luce solare mediante l'effetto fotovoltaico. Negli ultimi anni, grazie agli incentivi statali, in Italia si è verificato un notevolissimo incremento di GW installati, tanto da portare alla chiusura di diverse centrali elettriche di tipo convenzionale. Ad oggi il punto critico della tecnologia PV è la mancanza di accumulo: tutta l'energia generata deve essere subito immessa in rete. D'altra parte nelle ore notturne non c'è produzione e di giorno la nuvolosità riduce e destabilizza la resa, rendendo complessa l'integrazione e la gestione del PV nella rete di distribuzione elettrica. Per ovviare a questo serio limite è partita la corsa allo sviluppo di batterie a basso costo e basso impatto ambientale per dotare il PV di accumulo.

Un diverso approccio, di origine assai antica (si pensi ai famosi specchi ustori di Archimede), è il solare a concentrazione (Concentrating Solar Power, CSP): mediante specchi (concentratori) la luce solare è focalizzata in un'area ridotta ove è posto un ricevitore per la conversione dell'energia luminosa in energia termica veicolata da un fluido termo-vettore. Il fluido termo-vettore riscaldato può essere utilizzato sia per fornire energia termica che per produrre energia elettrica;

Contact person: Marco Montecchi
marco.montecchi@enea.it

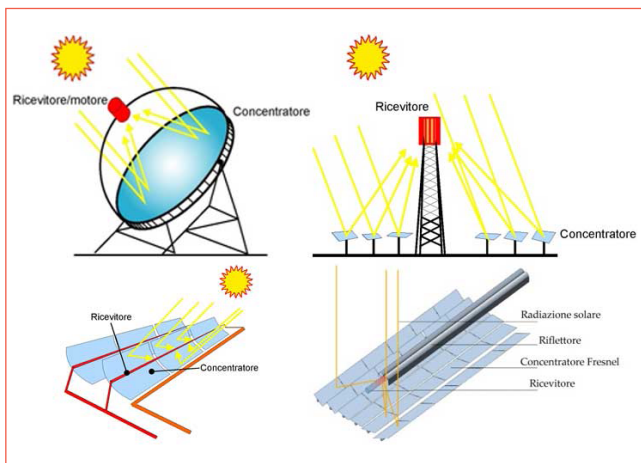


FIGURA 1 Tipologie impianti CSP: dish (in alto a sinistra), torre (in alto a destra), parabolico-lineare (in basso a sinistra), Fresnel-lineare (in basso a destra)
Fonte: ENEA

nonché può essere accumulato in vista di un utilizzo successivo. Energia-termica e accumulo sono i due vantaggi che il CSP oggi vanta nei confronti del più economico PV.

Come mostrato in Figura 1, gli impianti CSP sono classificati in tre tipologie: 1) dish, 2) torre e 3) lineare, suddiviso a sua volta in parabolico e Fresnel. L'ENEA, con il Grande Progetto Solare Termodinamico (GPST), a partire dal 2001 ha sviluppato la tecnologia Italiana per il CSP di tipo parabolico-lineare, stimolando al contempo lo sviluppo di una articolata filiera industriale nazionale [1]. Il progetto è culminato il 15 luglio 2010 con l'inaugurazione della prima centrale a sali fusi al mondo: la centrale ENEL Archimede di Priolo Gargallo (Siracusa), 5 MWe, costruita interamente con tecnologia Italiana [2]. In quanto segue saranno brevemente ricordati gli aspetti salienti del GPST e alcuni degli strumenti sviluppati in ENEA di natura squisitamente ottica.

Il Grande Progetto Solare Termodinamico, pietra miliare per l'Italia

Il Grande Progetto Solare Termodinamico è nato per iniziativa del premio Nobel Carlo Rubbia, Presidente dell'ENEA dal 1999 al 2005. Nella visione di Rub-

bia il CSP era una tecnologia di interesse strategico nazionale perché poteva essere utilizzata per ridurre la dipendenza energetica dell'Italia dall'estero: nel Sud dell'Italia si sarebbero dovute costruire un primo gruppo di 10 centrali da 50 MWe (2007, durante il secondo governo Prodi). Purtroppo ad oggi quel sogno non si è ancora realizzato, ma rimane la solida realtà di una tecnologia e di una filiera industriale che in taluni casi ha raggiunto livelli d'eccellenza ancora ineguagliati nel resto del mondo.

La tecnologia italiana nasce adottando diverse soluzioni innovative che la hanno contraddistinta fin dall'inizio: 1) l'utilizzo di sali-fusi come fluido termovettore con l'innalzamento della temperatura massima a 550 °C ; 2) lo sviluppo di un rivestimento ottico resistente a 550 °C, fortemente assorbente nella regione VIS-NIR e basso emissivo in quella IR per ridurre le perdite per irraggiamento, 3) specchi a vetro sottile (meno di 1 mm di spessore, per innalzare la riflettanza solare) accoppiati a dorso rigido che conferisce la forma parabolica-lineare; 4) semplificazione della struttura meccanica del collettore mediante l'introduzione del tubo di torsione da cui dipartono le centine, collegate da correnti su cui sono installati i pannelli riflettenti.

Per realizzare il GPST Rubbia costituì in ENEA un apposito gruppo di lavoro, composto da circa 100 persone, tra ingegneri, fisici, chimici, tecnici e amministrativi. Fin dall'inizio il progetto è stato caratterizzato da un profondo contatto con l'industria nazionale: una volta disegnato un componente, si andava alla ricerca delle industrie capaci di realizzarlo, per poi sollecitarle alla produzione di prototipi. Tali prototipi erano quindi caratterizzati in ENEA, innescando in molti casi un circuito pubblico-privato di ricerca e sviluppo del componente.

La capacità di caratterizzare il componente è di fondamentale importanza sia per verificare la rispondenza delle caratteristiche del manufatto alle necessità del progetto, sia per confrontare tra loro componenti di produttori diversi. Perciò nel corso dello sviluppo del progetto, sono state realizzate tutte le attrezzature necessarie alla qualifica dei componenti; talune di carattere originale. Diverse di queste attrezzature sono basate sulla luce, o più propriamente sull'ottica; ad esse è dedicato il seguito del presente articolo.

Luce per caratterizzare

Nel CSP lo specchio è il primo anello della catena di produzione dell'energia e per questo svolge un ruolo di primaria importanza.

Per comodità il concentratore solare è suddiviso in pannelli riflettenti di dimensioni adatte al trasporto e al maneggiamento (tipicamente 1-2 m per lato). Le caratteristiche principali di qualsivoglia pannello sono la *riflettanza solare* (la media sullo spettro di emissione solare) e la *forma*: la prima indica la frazione di energia solare rinviata verso il ricevitore; la seconda determina la distribuzione della radiazione solare nei dintorni della zona focale dove è posto il ricevitore. Entrambe queste caratteristiche possono essere misurate con strumenti ottici, ossia basati sulla luce.

Misurare la riflettanza solare: SMQ

Per calcolare la riflettanza solare è necessario misurare lo spettro di riflettanza nell'intervallo di emissione solare (circa 300-2500 nm, vedi Figura 2) per poi mediarlo sullo spettro di emissione stesso.

Sebbene questo compito possa apparire semplice, a tutt'oggi non è codificato da una normativa internazionale. Nell'ambito del Task III di SolarPACES un gruppo di esperti (tra cui ENEA) sta scrivendo le linee guida [3], coadiuvato dall'attività sperimentale svolta da alcuni dei più importanti laboratori (CEA, CENER, CIEMAT, ENEA, DLR, ISE) su un gruppo di campioni rappresentativi della produzione industriale. La difficoltà maggiore proviene dalla peculiarità della riflettanza di interesse per il CSP: come mostrato in Figura 3, la sorgente (il Sole) è estesa, sicché la radiazione incidente è divergente ($2\varphi_S = 9,7$ mrad in condizioni di cielo sereno); lo specchio può aumentare ulteriormente la divergenza della radiazione riflessa per scattering di superficie; in ogni caso il ricevitore può catturare solo la radiazione riflessa all'interno dell'angolo di visuale sotteso dal punto di riflessione ($2\varphi_R$).

Attualmente non esistono strumenti commerciali capaci di siffatta misura, pertanto i laboratori stanno approntando degli apparati sperimentali ad hoc; la Figura 4 mostra lo schema del SMQ [4] proposto da ENEA, capace di misurare la riflettanza emisferica, quasi-speculare con φ_R tra 3 e 20 mrad, e diffusa oltre 20 mrad a tre lunghezze d'onda nel visibile. Brevemente, il fascio laser

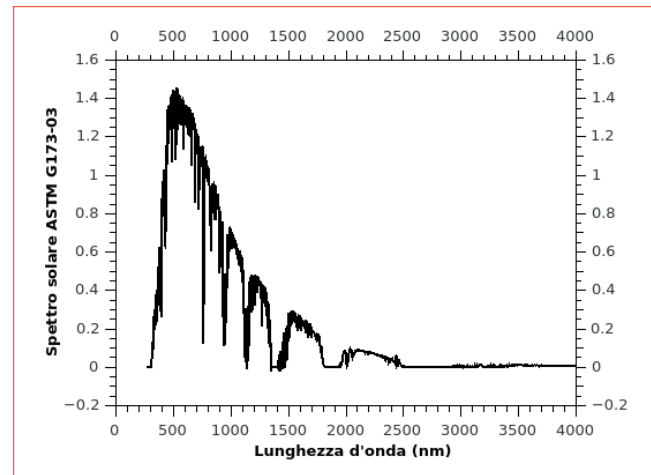


FIGURA 2 Spettro di emissione solare secondo la normativa ASTM G173-03
Fonte: elaborazione ENEA su dati ASTM

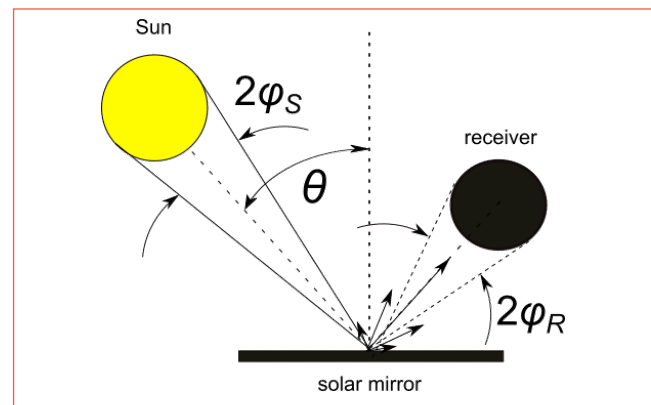


FIGURA 3 Nelle applicazioni CSP lo specchio è utilizzato per riflettere la radiazione solare sul ricevitore. La frazione intercettata dipende dagli angoli di divergenza solare $2\varphi_S$ e di visuale del ricevitore $2\varphi_R$ che è sotteso dal punto di riflessione
Fonte: ENEA

(divergenza minore di 1 mrad) di uno dei tre diodi-laser è inviato sul campione. Nella configurazione superiore il riflesso è analizzato mediante la sfera integratrice IS1 per diversi valori del semi-angolo di accettazione φ_R (tra 3-20 mrad); nel contempo mediante IS2 è misurata la radiazione diffusa oltre 20 mrad. Nella configurazione inferiore, a parità di condizioni, si misura la riflettanza

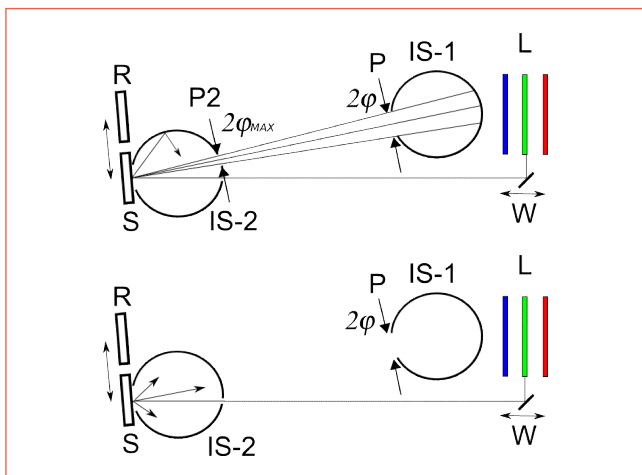


FIGURA 4 Schema del Solar Mirror Qualification set-up sviluppato da ENEA
Fonte: ENEA

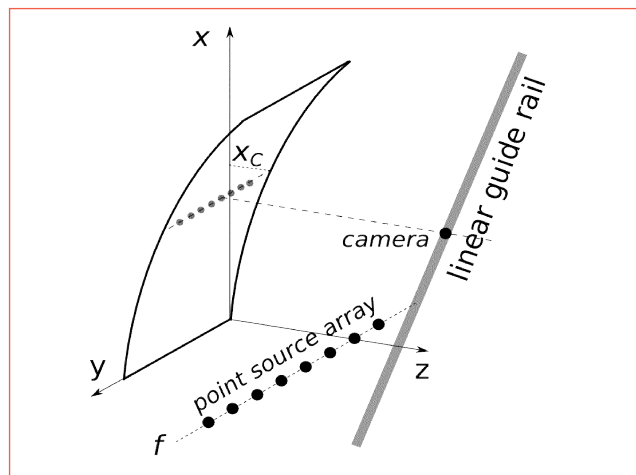


FIGURA 5 Schema ottico del VISprofile, lo strumento per misurare la forma dei pannelli parabolici-lineari in laboratorio/ambiente di produzione sviluppato da ENEA
Fonte: ENEA

emisferica. Sulla base dei valori così misurati e dello spettro della riflettanza emisferica (misurato con uno spettrofotometro commerciale equipaggiato con sfera integratrice), è possibile stimare l'andamento della riflettanza solare in funzione dell'angolo di incidenza e dell'angolo di accettazione del ricevitore.

Misurare la forma: VISprofile

Sebbene in linea di principio la forma di un pannello riflettente possa essere misurata con un tastatore meccanico, nella realtà, per convenienza economica e di tempo di misura, si utilizzano sempre metodi ottici, quali fotogrammetria, scansione laser, e deflettometria. Recentemente ENEA ha introdotto il Sistema di Ispezione Visiva (VIS) [5], sviluppando una famiglia composta di strumenti. La metodologia VIS si basa sull'idea di osservare da uno o più punti nel campo vicino, uno o più sorgenti luminose poste nei dintorni del fuoco nominale dello specchio. La Figura 5 mostra lo schema del VISprofile [6], strumento per la misura della forma in laboratorio/ambiente industriale di pannelli per il CSP parabolico-lineare: una serie di sorgenti puntuali sono allineate lungo la linea focale nominale della parabola; una camera installata su un binario motorizzato acquisisce immagini in corrispondenza di diversi valori dell'ascissa della parabola. Conoscendo le posizioni i) di

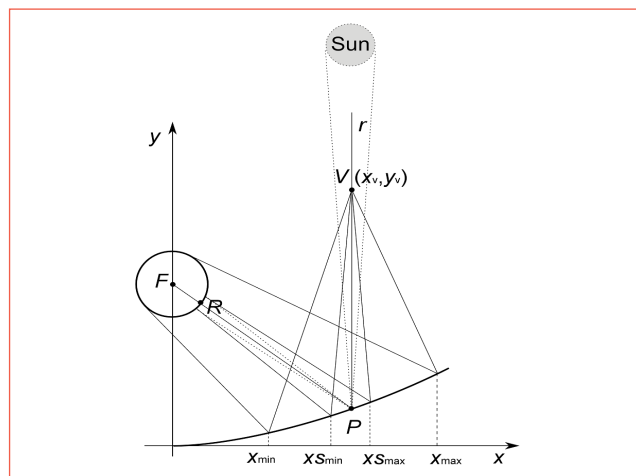


FIGURA 6 Schema ottico del VISfield, lo strumento per la verifica in campo dello stato di mutuo allineamento di parabola-lineare e ricevitore
Fonte: ENEA

ogni sorgente puntuale, ii) delle loro rispettive immagini osservate dalla camera sulla superficie del pannello e iii) della camera stessa, è possibile desumere il versore normale alla superficie; integrando opportunamente si ricostruisce la forma 3D del pannello; infine mediante

simulazione (ray-tracing) è possibile stimare l'efficienza di concentrazione del pannello. La bontà del pannello è espressa da una serie di parametri, tra cui lo scostamento dalla forma parabolica di riferimento in termini di quota e arcotangente della superficie, nonché dal fattore di intercettazione, ossia la frazione dei raggi riflessi intercettata geometricamente dal ricevitore.

ENEA ha firmato un accordo di collaborazione con la MARPOSS al fine di commercializzare gli strumenti VIS. In questi mesi è in corso di ultimazione il primo prototipo industriale di VISprofile presso la sede MARPOSS di Bentivoglio (Bologna).

Misurare l'allineamento in campo: VISfield e VISfly

Il giusto problema da porsi in campo, di fronte ad un collettore parabolico-lineare, non è quale sia la forma di ogni singolo pannello, bensì qual è lo stato del mutuo allineamento di parabola-lineare e tubo ricevitore. Il concentratore lineare è costituito da collettori a loro volta composti da moduli larghi 12 m, con apertura della parabola di 6 m circa. In campo la metodologia VIS è applicata utilizzando come "sorgente" lo stesso tubo ricevitore; lo schema ottico del VISfield [7] è mostrato in Figura 6.

In sostanza il fattore di intercettazione è desunto dalla sovrapposizione tra l'immagine del tubo ricevitore e la zona attesa dello spot solare (Figura 7).

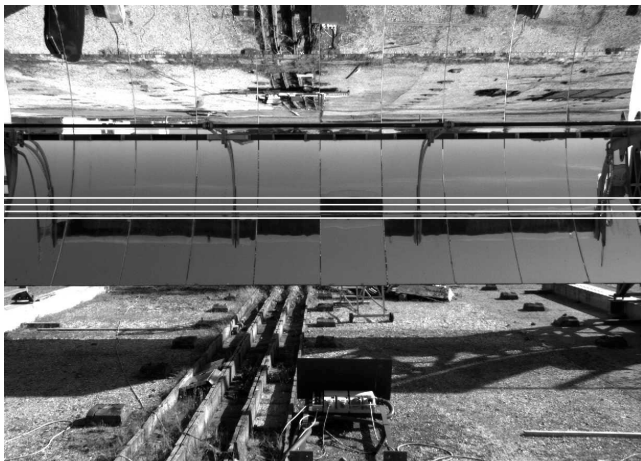


FIGURA 7 Valutazione del fattore di intercettazione in una delle immagini acquisite con il VISfield
Fonte: ENEA

La Figura 8 mostra il carrello VISfield commercializzato dalla MARPOSS: il carrello va posizionato centralmente al modulo in esame, a circa 7 m di distanza; quindi si abbassano gli stabilizzatori e si mette in bolla. Alla camera è abbinata una livella laser che consente di portare con precisione la camera alla quota dell'asse di rotazione del modulo. Orientando il modulo verso l'orizzonte è possibile verificare la correttezza dell'angolo di offset ed eventualmente correggerlo. Quindi si scansiona il modulo ottenendo sia la mappa del fattore di intercettazione (Figura 9) che indicazioni puntuali su come migliorare l'allineamento di ogni singolo pannello. Infine, se non ci sono margini di miglioramento, la mappa del fattore di intercettazione rappresenta il controllo finale della bontà della forma di ogni singolo pannello in termini di funzionalità. I pannelli difettosi dovranno essere sostituiti con altri più conformi alle specifiche. Il limite principale del VISfield è il tempo di misura complessivo: tra posizionamento, allineamento e misura, occorrono circa 30 minuti/modulo (senza apportare modifiche al modulo). Pertanto il VISfield è uno strumento assai utile durante l'installazione

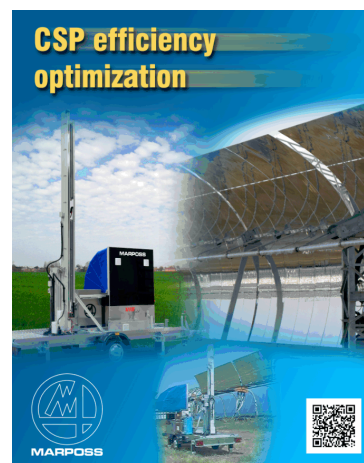


FIGURA 8 Locandina pubblicitaria del VISfield commercializzato da MARPOSS su licenza ENEA
Fonte: MARPOSS

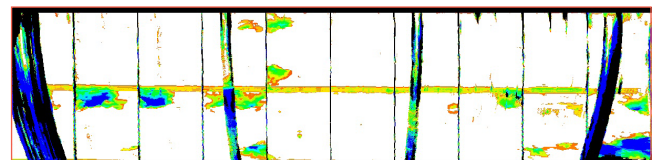


FIGURA 9 Mappa del fattore di intercettazione ottenuta con il VISfield di un semi-modulo dell'impianto Prova Collettori Solari, installato presso il Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA
Fonte: ENEA

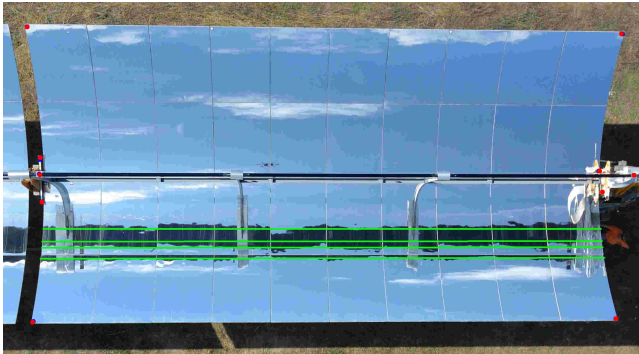


FIGURA 10 Valutazione del fattore di intercettazione per una immagine aerea ripresa dal VISfly
Fonte: ENEA

dell'impianto, ma non adatto alla verifica periodica dello stesso, poiché un campo solare di norma è composto da migliaia di moduli.

Per ovviare a questo limite, in collaborazione con un operatore esperto di droni (Cloud-Cam by Nuovi Sistemi) e della MARPOSS, si sta sperimentando la versione volante denominata VISfly, ossia un drone equipaggiato con una camera nel visibile per la verifica di allineamento sopra descritta. Inoltre, per massimizzare il rapporto benefici/costi il drone è anche munito di termo-camera per il controllo dello stato di vuoto dei tubi ricevitori (i tubi che hanno perso il vuoto appaiono più caldi degli altri). Il VISfly è meno accurato del VISfield, ma fornisce un quadro complessivo dello stato del campo solare, localizzando e valutando i moduli più carenti. Successivamente il VISfield può essere utilizzato in maniera mirata sui moduli più carenti. Il problema principale del trasporto della metodologia VIS su drone è la determinazione della posizione e dell'assetto del drone. La tecnologia nel settore è in tumultuoso sviluppo e stanno comparando sul mercato i primi dispositivi elettronici *Differential Global Position System* e *Real Time Kinematic* imbarcabili su drone. Nel frattempo si stanno ottenendo dei risultati assai interessanti utilizzando la fotogrammetria su un esiguo numero di target, disposti nei punti cospicui di ogni modulo (Figura 10).

Allineare e caratterizzare un dish: VISdish

Come detto nell'introduzione, l'ENEA con il GPST ha studiato la tipologia CSP parabolico-lineare. Pertanto la maggior parte degli strumenti di misura finora svi-

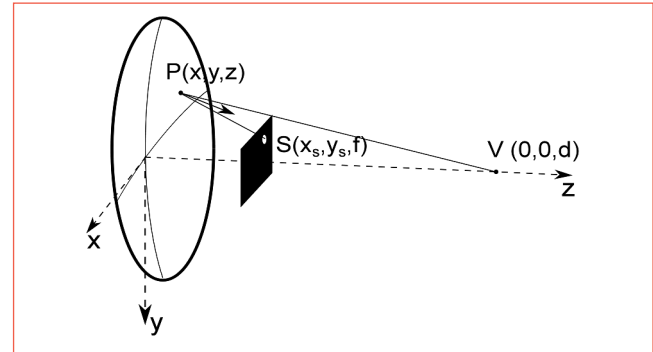


FIGURA 11 Schema ottico del VISdish, lo strumento per la caratterizzazione ottico-geometrica in campo di un dish
Fonte: ENEA

luppato sono adatti a questa tipologia di impianto; tuttavia la metodologia VIS può essere applicata anche alle altre. Un esempio ne è il VISdish in corso di sperimentazione sul dish recentemente installato in ENEA Casaccia nell'ambito del progetto Europeo OMSOP [8]. Il fine del progetto è di sperimentare l'utilizzo di una micro-turbina a gas al posto dell'usuale motore Stirling, posizionato assieme al ricevitore nel fuoco del dish.

Come mostrato in Figura 11 nel VISdish la "sorgente" è costituita da uno schermo TV LCD da 50" posizionato nei pressi del punto focale. L'osservatore V è in posizione fissa, lungo l'asse del paraboloide a qualche decina di metri dal vertice del dish. Lo strumento ha una doppia funzionalità: 1) allineamento dei pannelli e infine 2) misura della forma 3D del paraboloide. Nel primo caso lo schermo LCD visualizza un singolo disco bianco (S) su fondo nero, posizionato in modo tale che l'osservatore veda l'immagine di S riflessa in corrispondenza del centro del pannello in esame (P), assumendo che questo sia correttamente allineato secondo la superficie del paraboloide ideale. In caso contrario si dovrà agire sui punti di aggancio del pannello in modo da allinearli per realizzare la condizione summenzionata.

Una volta che tutti i pannelli siano stati registrati, lo strumento opera nella seconda modalità: il disco bianco S è via via visualizzato in tutti i quadranti di una scacchiera ideale in cui lo schermo LCD è stato suddiviso, acquisendo di volta in volta l'immagine del dish e calcolando la normale alla superficie del paraboloide in tutti i punti P dove è riflessa l'immagine di S. Aggiu-



stando la dimensione del disco S e il passo della scacchiera sullo schermo è possibile campionare la normale alla superficie del dish in modo sufficientemente fitto da poter ricostruire la sua forma 3D. Quindi con un software di simulazione appositamente sviluppato (SIMULDISH) sarà possibile valutare sia la posizione ottimale della finestra del ricevitore che la distribuzione dell'intensità della radiazione solare concentra-

ta incidente. Questa valutazione sarà confrontata con i risultati sperimentali della misura del flusso ottenuta misurando il bagliore della radiazione solare concentrata diffusa da una lastra di rame raffreddata, rivestita di allumina, posta nel fuoco. ●

Marco Montecchi

ENEA, Dipartimento Tecnologie Energetiche,
Laboratorio ingegneria delle tecnologie solari

abstract

Concentrating solar power: a sustainable and renewable way to get energy from solar light

Solar light irradiating the Earth is a great sustainable and renewable power source. In concentrating solar power plants, mirrors are used to redirect the solar light toward a small area where a receiver captures and converts it into thermal-energy which can be stored. ENEA has been developing the parabolic-trough Italian technology, as well as several facilities for the component characterization. The paper reports on some of those which are purely optical instruments.

bibliografia

- [1] V. Brignoli, "Solare Termico Italiano", <http://www.solarthermalpower.it/Storia%20Grande%20Progetto%20Solare%20Term.%20Archimede%281%29.htm>
- [2] Sito ENEA, "Impianto Archimede", <http://www.enea.it/it/per-la-stampa/le-parole-dellenergia/solare-termodinamico/impianto-archimede>
- [3] Sito SolarPACES, "Reflectance guidelines", <http://www.solarpaces.org/tasks/task-iii-solar-technology-and-advanced-applications/reflectance-measurement-guideline>
- [4] M. Montecchi (2014), "Upgrading of ENEA Solar Mirror Qualification Set-up", *Energy Procedia* vol. 49, 2154-2161 (2014)
- [5] M. Montecchi: Metodo e Sistema di Ispezione Visiva per il Controllo di Qualità della Forma di Riflettori Concentratori. Brevetto Italiano n. 1388769, depositato il 3 marzo 2008, n. domanda RM2008A000151
- [6] M. Montecchi, A. Benedetti, G. Cara (2011), "Fast 3D optical-profilometer for the shape-accuracy control of parabolic-trough facets", in *Proceedings of 17th SolarPACES Conference*, September 20-23 2011 Granada (Spain). <http://www.solarpaces2011.org/cms>
- [7] M. Montecchi, A. Benedetti, G. Cara (2010), "Optical alignment of parabolic trough modules", in *Proceedings of 16th SolarPACES Conference*, September 21-24 2010 Perpignan (France). <http://www.solarpaces.org/index.php/2013-09-19-07-40-05/16th-solarpaces-conference-21-24-september-2010-perpignan-france>
- [8] Sito progetto OMSoP, <https://omsop.serverdata.net/Pages/Home.aspx>