

## Laboratorio di Ottica dei Collettori Solari

Il Laboratorio di Ottica dei Collettori Solari offre un servizio di caratterizzazione e controllo di qualità dei concentratori solari a favore di produttori e utilizzatori di sistemi CSP. Le misure sono effettuate rispettando procedure e linee guida internazionali allo stato dell'arte, mediante metodi e strumenti avanzati e innovativi.

Riguardo alla caratterizzazione degli specchi, i principali parametri investigati sono: 1) la riflettanza solare; 2) la forma 3D della superficie riflettente. Da quest'ultima, mediante *ray-tracing*, è possibile determinare il fattore di intercettazione specifico per l'utilizzo finale. In caso di applicazioni particolari, il laboratorio è in grado di progettare e assemblare sistemi di misura ad hoc. Di seguito sono sinteticamente descritti i principali strumenti a disposizione del laboratorio.

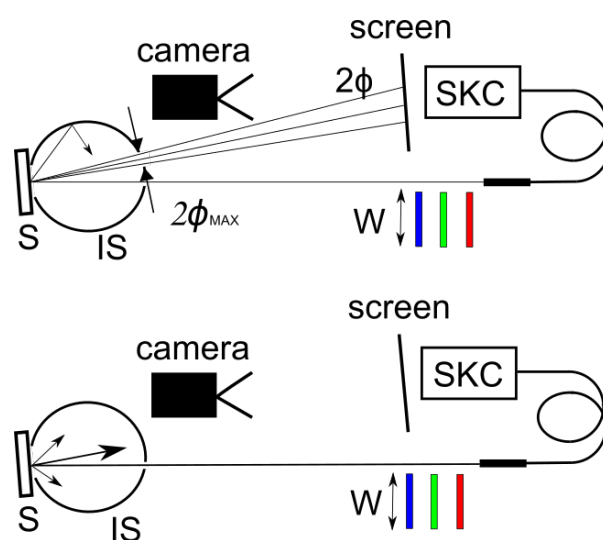
### Solar Mirror Qualification set-up versione 2.0 (SMQ2)

Come descritto nelle linee guida SolarPACES, per calcolare la riflettanza solare è necessario conoscere lo spettro di riflettanza nella regione 320-2.500 nm e calcolarne, successivamente, il valore medio utilizzando lo standard ASTM G173.

La riflettanza di interesse per le applicazioni CSP è quella quasi-speculare, in funzione degli angoli di incidenza sullo specchio e di accettazione del ricevitore. Al momento non esistono strumenti commerciali adatti a tale scopo. ENEA ha proposto una strategia innovativa basata sulla misura sperimentale dello spettro della riflettanza emisferica ad incidenza quasi normale (con un spettrofotometro commerciale equipaggiato con sfera integratrice da 150 mm), e del rapporto quasi-speculare/emisferica per alcune lunghezze d'onda mediante il *Solar Mirror Qualification set-up*.

Sulla base di questi dati sperimentali, utilizzando un metodo basato sull'*Equivalent Model Algorithm* (EMA) e una versione leggermente modificata dell'equazione *Total Integral Scattering* (TIS), si possono predire gli spettri di riflettanza quasi-speculare per luce polarizzata a qualsivoglia angolo di incidenza nella regione 3-50 mrad di accettazione. Infine, considerando la media delle due polarizzazioni s e p, è possibile ottenere il valore medio di riflettanza solare.

Il sistema di misura SMQ2 utilizza un laser bianco (SKC), filtrato con uno tra tre filtri passa-banda (blu, verde, rosso), ottenendo un fascio con divergenza e sezione tipici di un laser, ma con lunghezza di coerenza tipica di una sorgente incoerente. Mediante la sfera integratrice IS è possibile misurare la parte complementare alla riflettanza quasi-speculare all'angolo  $\phi_{MAX}$  (configurazione superiore) e quella emisferica (configurazione inferiore). Acquisendo con la camera 4 immagini 14 bit *depth* a tempi di esposizione crescenti dello spot del fascio riflesso catturato sullo schermo, si costruisce un'unica immagine



Schema del sistema di misura SMQ2

64 bit float; si calcola, quindi, l'integrale radiale dei livelli di grigio puntato sul centro spot, ottenendo una curva che, una volta scalata sul punto sperimentale ottenuto a  $\phi_{MAX}$ , rappresenta la riflettanza quasi-speculare in funzione dell'angolo di accettazione alla lunghezza d'onda del filtro passa-banda selezionato. Segue, infine, l'ottimizzazione del modello ibrido EMA-TIS sui dati sperimentali per consentire la predizione della riflettanza quasi-speculare a qualsivoglia angolo di incidenza ed angolo di accettazione nella regione 3-50 mrad.

## Famiglia strumenti VIS

La metodologia **Visual Inspection System** (VIS), brevettata nel 2008, è stata utilizzata negli anni successivi per sviluppare una famiglia composta di strumenti, tra cui:

1. VISfield, per la verifica in campo del mutuo allineamento ottico di moduli parabolico-lineari (PT);
2. VISshed, per verificare la bontà dell'assemblaggio del modulo PT prima della sua collocazione in campo;
3. VISprofile, per la misura in laboratorio della forma 3D di pannelli riflettenti per moduli PT;
4. VISprofileLF, come il precedente, ma per sistemi Fresnel lineari;
5. VISdish, allineamento pannelli, misura forma 3D e predizione del profilo del flusso di concentratori parabolici circolari;
6. VISfly, versione aerea del VISfield (ancora in fase di sviluppo).

Alcuni di questi strumenti, sono commercializzati dalla MARPOSS S.p.A sotto licenza ENEA. Nella figura è mostrato il carrello VISfield posizionato in campo per caratterizzare un modulo parabolico lineare.

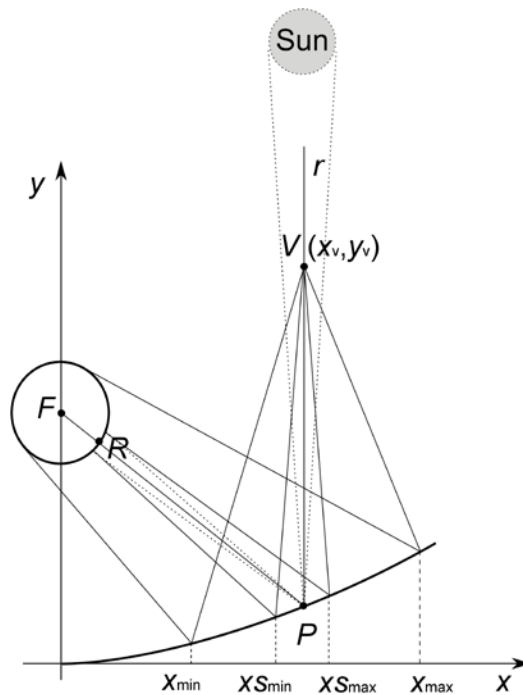
Originariamente la misura VISfield è stata concepita in modalità traslazionale:

1. il binario motorizzato verticale supporta una fotocamera digitale;
2. durante la misura la camera viene traslata acquisendo una sequenza di immagini a partire dalla quota dell'asse di rotazione del modulo PT fino a quella del suo bordo inferiore, mentre il modulo è mantenuto fermo in orientazione orizzontale.
3. la sequenza di immagini viene processata utilizzando la metodologia VIS, descritta in figura: si suppone che la camera sia posizionata nel punto V da cui si osserva il punto P avente la stessa ascissa di V. Si consideri l'ipotetico pennello di raggi solari riflesso in P e intercettato dal tubo ricevitore, formante lo spot centrato in R. L'osservatore in V vedrà l'immagine del tubo e su di esso lo spot solare riflesso dallo specchio. Per il principio di reversibilità di Helmholtz, l'osservatore deve vedere lo spot solare centrato in P indipendentemente dallo stato di allineamento del sistema. Di contro, in caso di disallineamento del tubo ricevitore dal fuoco, o di malformazione dello specchio o di cattivo allineamento dello specchio, l'osservatore vedrà l'immagine del tubo ricevitore decentrata rispetto a P. Il fattore di



Carrello di misura VISfield in assetto di misura in campo

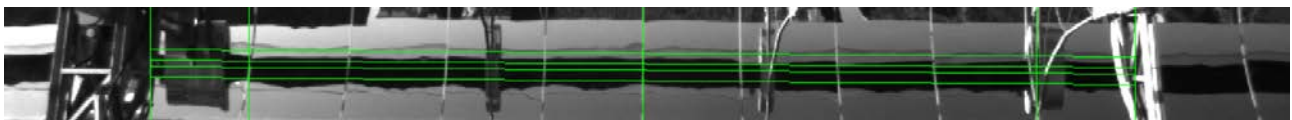
intercettazione, ossia la frazione di cattura geometrica del pennello di raggi solari riflesso in P è dato dalla frazione dello spot solare che appare sovrapposta all'immagine del tubo ricevitore.



**Schema ottico del metodo VIS per la valutazione del fattore di intercettazione di un modulo parabolico lineare**

La figura sottostante mostra l'applicazione del metodo VIS su una delle immagini della sequenza: la coppia di linee verdi più esterne rappresenta la posizione attesa del riflesso del tubo ricevitore, mentre quelle più interne la posizione dello spot solare. In questo caso il fattore di intercettazione è 1.

Il punto di forza del metodo VIS è la semplicità della valutazione, senza alcuna necessità di ricorrere al *ray-tracing*.



**Applicazione della tecnica VIS su una delle immagini acquisite per la valutazione del fattore di intercettazione**

Recentemente è stata sviluppata la modalità rotazionale della tecnica VISfield, secondo cui la camera è mantenuta in posizione fissa alla quota dell'asse di rotazione; le immagini sono acquisite mentre il modulo è in rotazione, in modo tale che dalla camera l'immagine del tubo ricevitore venga vista scansionare l'intera parabola, da un bordo all'altro. Il vantaggio conseguibile dalla nuova modalità sviluppata è l'estrema semplificazione dell'apparato sperimentale che può essere ridotto a un treppiede a sostegno della fotocamera digitale accoppiata ad una livella ottica laser; inoltre questa modalità sperimentale consente di misurare l'intera parabola, invece della sola semi-parabola inferiore.

### Attività in corso

Attualmente è in fase di svolgimento la verifica dello stato di allineamento dell'impianto PCS installato presso il C.R. ENEA Casaccia mediante il VISfield in modalità rotazionale. Alcune sequenze di immagini saranno condivise con NREL per confrontare la tecnica VIS (ENEA) con la DO (*Distant Observer*) sviluppata da NREL.

È in fase di svolgimento anche la caratterizzazione di una parte dell'impianto MATS realizzato in Egitto attraverso la tecnica VISfield in modalità rotazionale.

È, inoltre, in fase di completamento la messa in esercizio dell'apparato VISprofile fornito dalla MARPOSS. Seguirà uno studio per ottimizzare la calibrazione delle due fotocamere digitali, e l'implementazione dell'algoritmo per l'estrapolazione della forma 3D dall'analisi della sequenza di immagini.

Infine, è in corso l'aggiornamento del VISprofileLF con l'installazione del nuovo monitor e lo studio di una nuova procedura di misura volta alla drastica riduzione del numero delle immagini da acquisire.

### Attività future

In futuro si intende proseguire la sperimentazione del VISfly. Rispetto al Qfly sviluppato dal DLR, il principale beneficio del VISfly è la semplicità della tecnica VIS, che non richiede di stimare la forma della superficie specchiante il reale posizionamento del tubo ricevitore, né il fattore di intercettazione mediante *ray-tracing*.