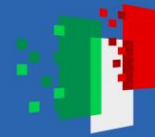




Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA

NEST
NETWORK FOR ENERGY SUSTAINABLE TRANSITION

ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI PALERMO PROGETTO NETWORK FOR ENERGY SUSTAINABLE TRANSITION (NEST-SPOKE 1)

FOTOVOLTAICO A CONCENTRAZIONE

Salvatore Ferruggia Bonura
Dipartimento di Fisica e Chimica "E. Segré"

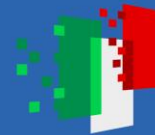
Palermo, 11/4/2025



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA

NEST
NETWORK FOR ENERGY SUSTAINABLE TRANSITION

SOMMARIO

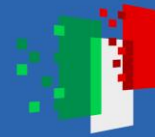
- Fotovoltaico a concentrazione
- Componenti di un sistema fotovoltaico a concentrazione
- Concentratori solari
- Inseguitori solari
- Sistemi di raffreddamento
- Esempi di sistemi fotovoltaici a concentrazione
- Conclusioni
- Ringraziamenti
- Bibliografia



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca

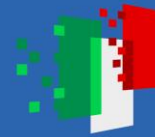


Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA

NEST
NETWORK FOR ENERGY SUSTAINABLE TRANSITION

FOTOVOLTAICO A CONCENTRAZIONE

- La tecnologia fotovoltaica a concentrazione (CPV) è basata sulla conversione diretta della radiazione solare concentrata in energia elettrica attraverso l'uso di celle fotovoltaiche.
- Vantaggi del CPV:
 - alta efficienza di conversione;
 - maggiore potenza elettrica di uscita;
 - riduzione del costo generale del sistema fotovoltaico.
- Difficoltà:
 - irraggiamento non uniforme delle celle fotovoltaiche;
 - elevate temperature delle celle dovute alle elevate intensità di radiazione.



FOTOVOLTAICO A CONCENTRAZIONE (2)

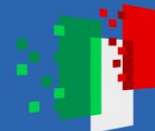
- Irradianza solare: potenza per unità di area ricevuta dal Sole sotto forma di energia elettromagnetica [W/m^2]
- L'irradianza solare di picco sulla Terra vale: $Q = 1 \text{ kW}/\text{m}^2$ (1 sole)
- La potenza erogata da una cella solare è data da [1]:

$$P = V_{OC} \cdot I_{SC} \cdot FF$$

in cui: V_{OC} : tensione a circuito aperto [V]; I_{SC} : corrente di corto circuito [A]; FF: fill factor.

$$FF = \frac{P_m}{V_{OC} \cdot I_{SC}}$$

- P_m : massima potenza data dalla cella [W].



FOTOVOLTAICO A CONCENTRAZIONE (3)

- Se la cella è illuminata con X (fattore di concentrazione) soli, con irradianza XQ [kW/m²]:

$$P_X = V_{X,OC} \cdot I_{X,SC} \cdot FF_X$$

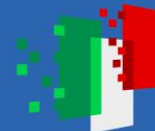
- Risulta [1]:

$$V_{X,OC} = V_{OC} + \frac{kT}{q} \ln X$$

in cui $\frac{kT}{q} \cong 26$ mV a $T = 300$ K.

L'efficienza della cella solare di area A [m²] con irradianza di 1 sole risulta: $\eta = \frac{P}{QA}$

Per X soli: $\eta_X = \frac{P_X}{XQA}$



FOTOVOLTAICO A CONCENTRAZIONE (4)

- L'efficienza della cella solare con irraggiamento di X soli risulta [1]:

$$\eta_X = \eta \frac{P_X}{XP} = \eta \left(1 + \frac{kT \ln X}{q V_{OC}} \right) \left(\frac{FF_X}{FF} \right)$$

- Valori teorici calcolati di incremento dell'efficienza con diversi fattori di concentrazione X:

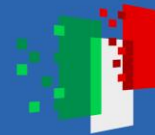
Tecnologia cella	Silicio policristallino	Silicio monocristallino	Tripla giunzione III-V su GaAS
V_{OC} (approx.)	550 mV	700 mV	850 mV
X = 10	10.8%	8.5%	7.0%
X = 100	21.6%	17.0%	14.0%
X = 1000	32.5%	25.5%	21.0%



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca

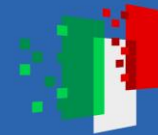


Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA

NEST
NETWORK FOR ENERGY SUSTAINABLE TRANSITION

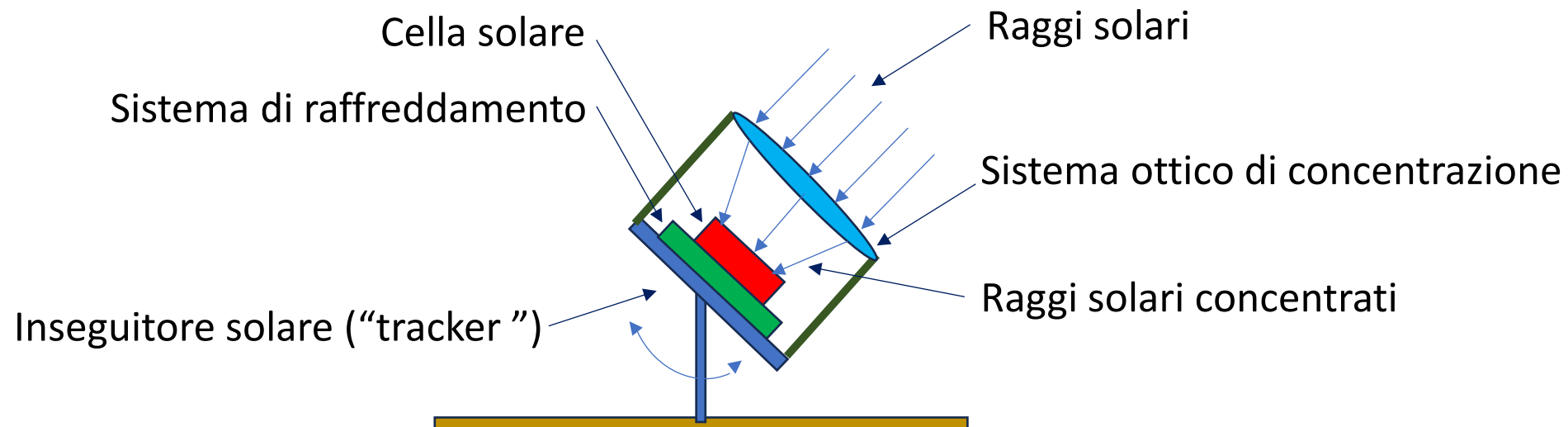
CLASSIFICAZIONE DEI SISTEMI FOTOVOLTAICI A CONCENTRAZIONE

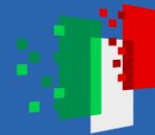
- I sistemi fotovoltaici a concentrazione si dividono in [2, 3]:
 - sistemi a bassa concentrazione (LCPV): $X = 2 \div 100$;
 - sistemi a media concentrazione (MCPV): $X = 100 \div 300$;
 - sistemi ad alta concentrazione (HCPV): $X = 300 \div 1000$;
 - sistemi ad ultra-alta concentrazione (UHCPV): $X > 1000$.



COMPONENTI DI UN SISTEMA FOTOVOLTAICO A CONCENTRAZIONE

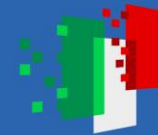
- Lo schema generale di un sistema fotovoltaico a concentrazione è [4, 5]:





SISTEMA OTTICO DI CONCENTRAZIONE

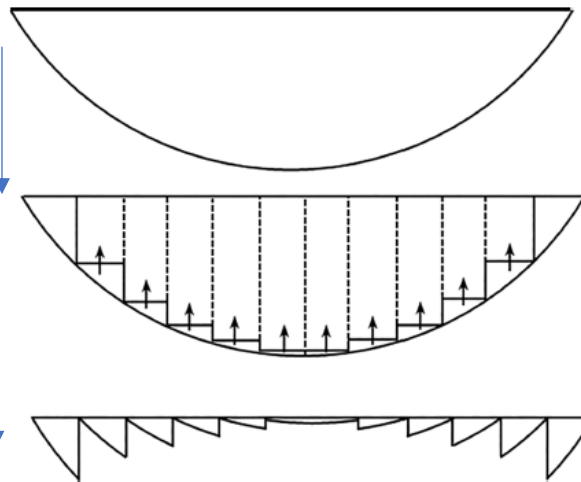
- Il sistema ottico di concentrazione (concentratore) raccoglie la luce solare da un'apertura di sezione A_a e la riporta su un'area ricevente A_r più piccola di quella di ingresso, aumentando quindi la densità di potenza.
- Si definisce il rapporto di concentrazione $C = \frac{A_a}{A_r}$.
- I concentratori funzionano sia in trasmissione, usando lenti, sia in riflessione, mediante specchi.
- Il concentratore, se non ben progettato, può produrre forti disuniformità di temperatura sulla cella fotovoltaica.
- Si utilizzano diversi tipi di concentratori:
 - concentratore a lente di Fresnel;
 - concentratore a disco;
 - concentratore piatto parabolico;
 - concentratore parabolico composto;
 - altri.



CONCENTRATORE ALENTE DI FRESNEL

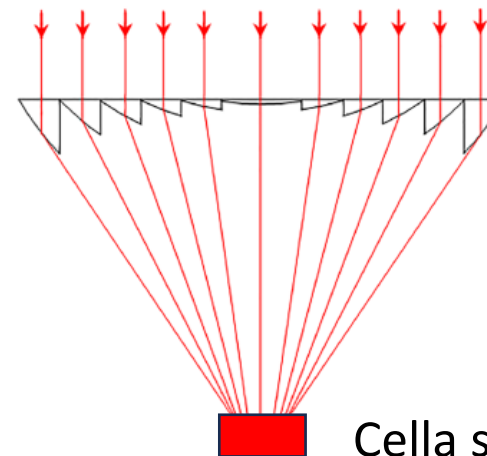
- Le lenti di Fresnel [6] sono state usate come concentratori a partire dagli anni '60.
- Si ricavano concettualmente dalle lenti focalizzatrici piano-convesse [6]:

Lente
piano-convessa



Lente
di Fresnel

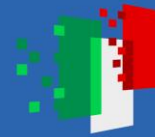
Concentratore a lente di Fresnel:



Cella solare

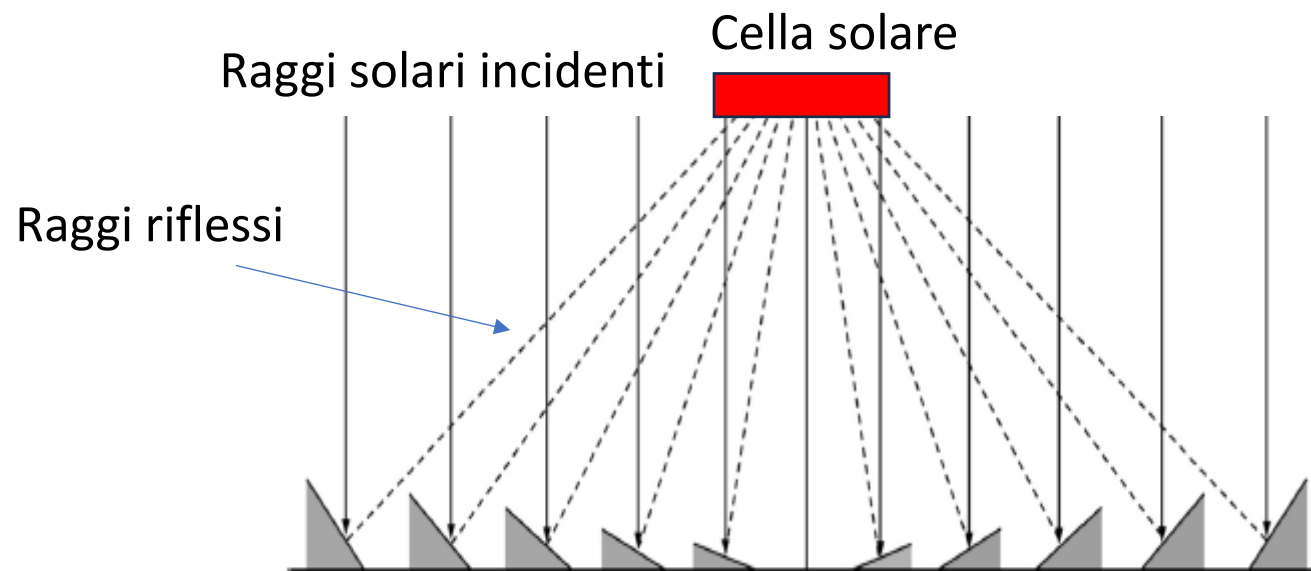
- Vantaggi:
 - basso costo;
 - peso leggero;
 - facilità di fabbricazione.
- Si usano per LCPV
($X = 10 \div 40$)

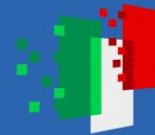
- Le lenti di Fresnel si realizzano in polimetil-metacrilato (PMMA) perché è leggero e termicamente stabile.



CONCENTRATORE A RIFLETTORE LINEARE DI FRESNEL

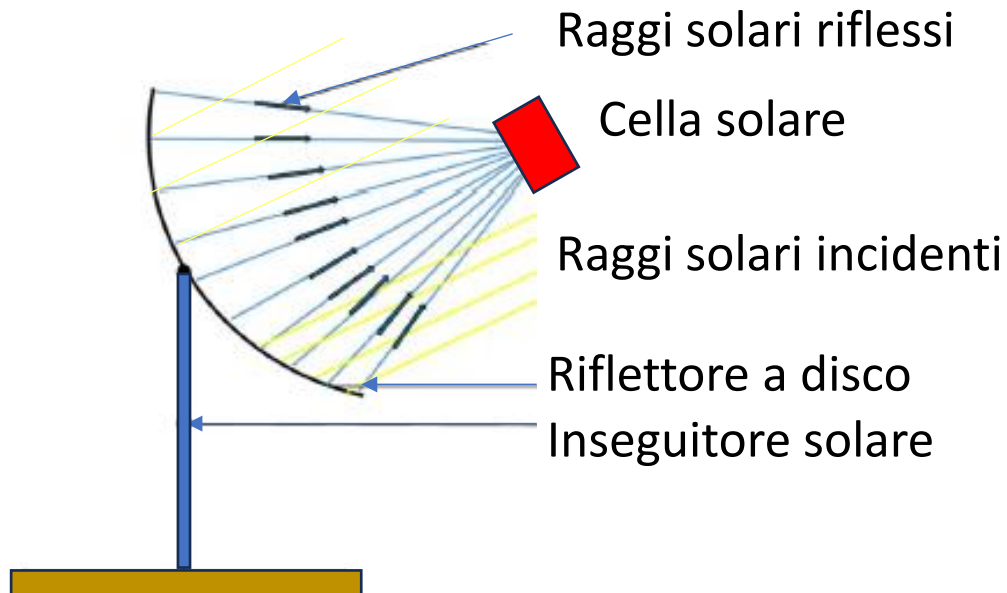
- Si impiega anche il concentratore a riflettore lineare di Fresnel [5, 7]:



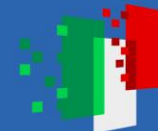


CONCENTRATORE A DISCO PARABOLICO

- Il concentratore a disco parabolico concentra i raggi solari sulla cella posta nel piano focale del riflettore [8, 9]:



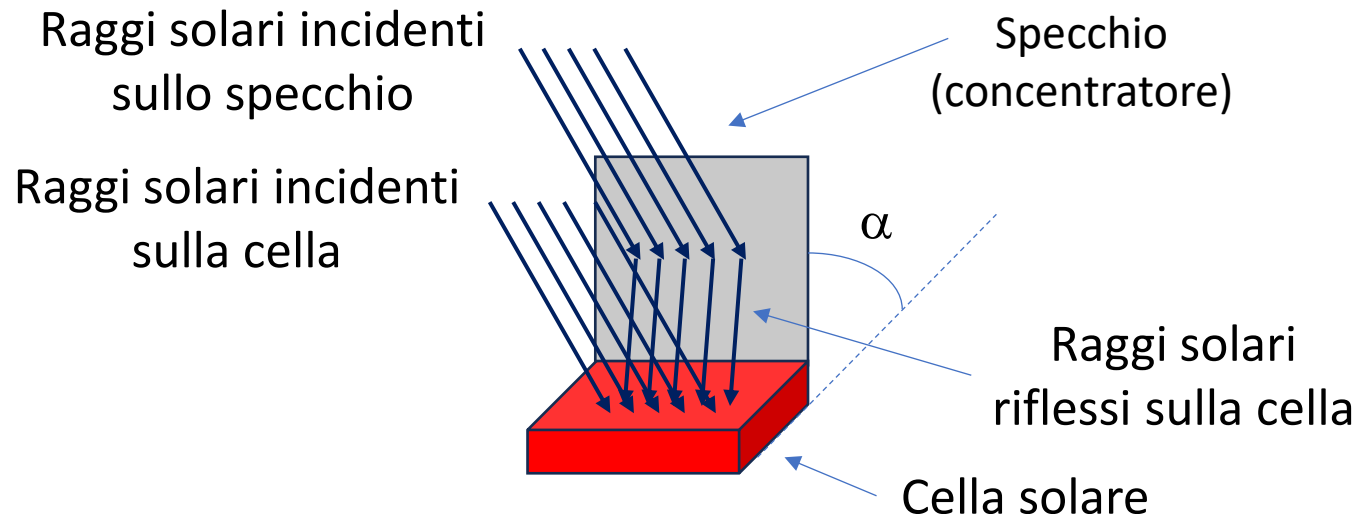
- Il concentratore a disco parabolico permette fattori di concentrazione da 1000 a 3000.
- Con questo sistema in genere si usa l'inseguitore solare per ottimizzare l'efficienza.



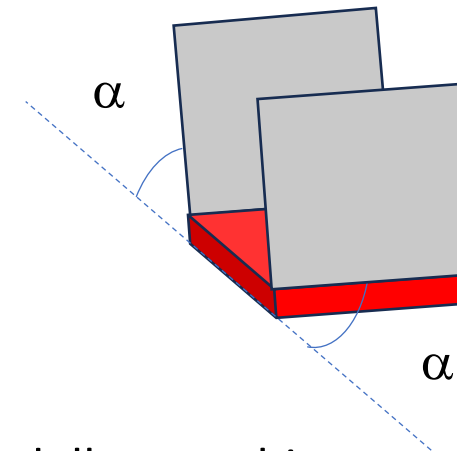
CONCENTRATORE PIATTO

- Il concentratore piatto ("V-trough") è il dispositivo di concentrazione più semplice [10]:

Singolo specchio



Doppio specchio



α : angolo dello specchio
con l'orizzonte

Vantaggi:

- concentrazione uniforme;
- basso costo.

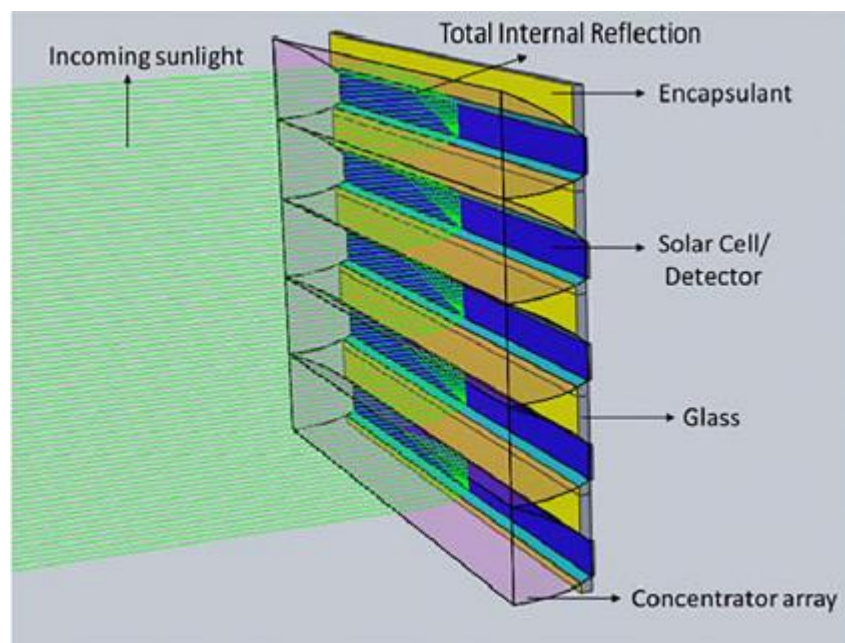
Svantaggio:

- fattore di concentrazione basso ($X < 3$).



CONCENTRATORE PARABOLICO COMPOSTO (CPC)

- Un concentratore parabolico composto è formato da due distinti elementi parabolici (metà superiori ed inferiori dei dispositivi nella figura) che riflettono la radiazione solare sulle celle poste al centro del CPC [11].



(Immagine da [11])

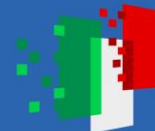
- Il CPC è utilizzato nei sistemi LCPV: $X = 2 \div 10$.
- Il fattore di concentrazione aumenta con l'altezza degli elementi parabolici.
- Possono essere realizzati a basso costo.
- Sono dispositivi che richiedono di essere orientati secondo l'asse est-ovest per massimizzare l'efficienza di generazione elettrica.



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca

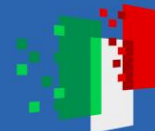


Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA

NEST
NETWORK FOR ENERGY SUSTAINABLE TRANSITION

INSEGUITORE SOLARE

- Gli inseguitori solari (“solar trackers”) orientano il pannello solare in modo da (idealmente) massimizzare la ricezione della radiazione incidente e quindi la potenza di uscita dal sistema [12 13].
- Gli inseguitori solari possono essere:
 - a singolo asse; incremento della potenza di uscita fino al 20% [13];
 - a doppio asse; incremento della potenza di uscita fino al 33% .
- Relativamente al sistema di attuazione:
 - inseguitori solari passivi (usano fluidi o leghe a memoria di forma)
 - Inseguitori solari attivi (usano motori, ingranaggi e circuiti elettronici).



INSEGUITORE SOLARE (2)

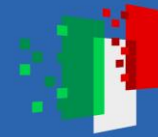
- Inseguitore solare ad anello aperto [14]: quando il sistema a motore che muove i pannelli che generano la potenza è pilotato da un segnale generato sulla base di dati o di un algoritmo memorizzati, senza riferimento ad un segnale esterno.
- Inseguitori solari ad anello chiuso [14]: quando il segnale prelevato da uno o più sensori (celle solari) solidali con i pannelli fotovoltaici generatori di potenza è utilizzato da un sistema di controllo (in genere a microprocessore) per implementare la reazione, cioè minimizzare il segnale di errore tra un riferimento ed i valori rilevati dai sensori.
- Inseguitore solare a singolo asse orizzontale (HSAT): il pannello ruota da est ad ovest durante il giorno attorno ad un asse fisso parallelo al suolo.
- Inseguitore solare a singolo asse verticale (VSAT): il pannello ruota da est ad ovest o da nord a sud attorno ad un asse verticale; si usano soprattutto ad elevate latitudini.



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA

NEST
NETWORK FOR ENERGY SUSTAINABLE TRANSITION

INSEGUITORE SOLARE (3)

- Esempio di inseguitore solare ad 1 asse orizzontale mod. KST 1P, Kseng solar:

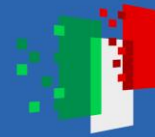




Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca

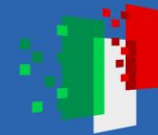


Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA

NEST
NETWORK FOR ENERGY SUSTAINABLE TRANSITION

SISTEMA DI RAFFREDDAMENTO

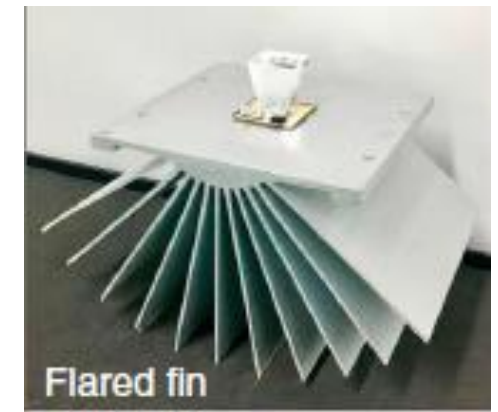
- La concentrazione della radiazione solare sulla cella fotovoltaica ne provoca il forte riscaldamento che riduce l'efficienza di generazione o potrebbe deteriorarla.
- E' necessario applicare alla cella specifici sistemi di raffreddamento, che devono ridurre la temperatura della cella mantenendo una distribuzione di temperatura uniforme.
- I sistemi di raffreddamento possono essere di tipo:
 - passivo;
 - attivo;
 - ibrido.



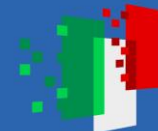
SISTEMA DI RAFFREDDAMENTO (2)

- Sistema di raffreddamento passivo [15]
 - Non richiede sorgenti di potenza esterna.
 - E' più semplice degli altri tipi e più economico.
 - E' meno efficiente degli altri tipi.
 - Si usa prevalentemente nei sistemi LCPV.
- Sistema di raffreddamento ad aria ("fin cooling"):
si usa la circolazione di aria naturale attraverso le alette di un dissipatore che supporta la cella fotovoltaica.

Due diversi tipi di dissipatori; il "flared fin" reduce del 10% la resistenza termica totale rispetto l'altro [16].



- Uso dei materiali a cambiamento di fase (PCM) che immagazzinano il calore di surriscaldamento della cella nel calore latente di una transizione di fase del materiale [17].
 - Sistema costoso.
 - Esempio di applicazione: paraffin wax RT-42 alla superficie posteriore della cella.

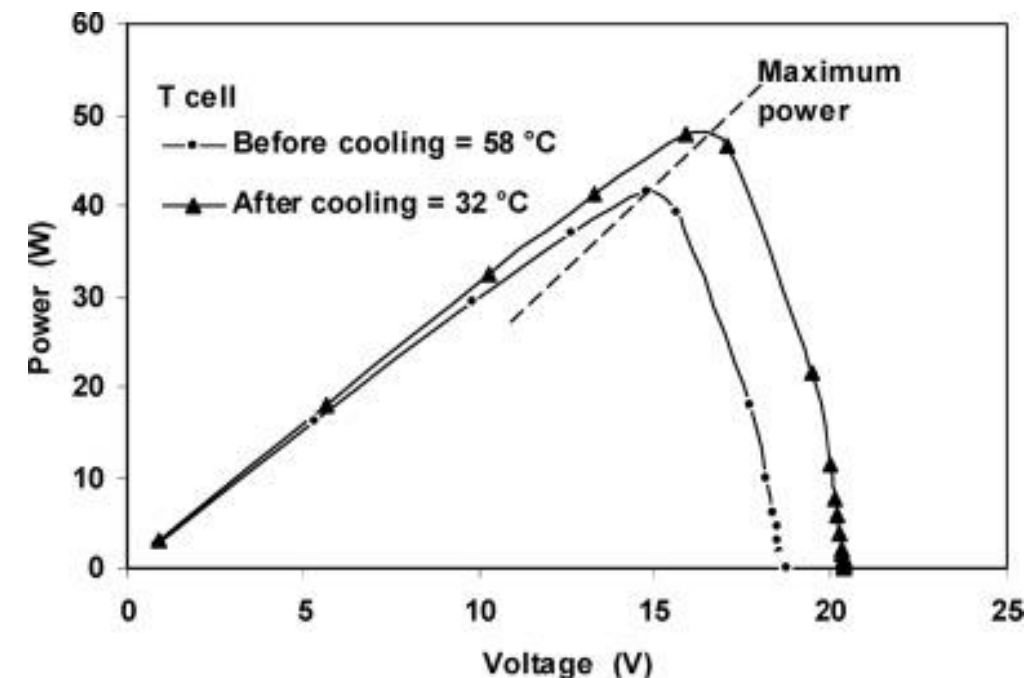


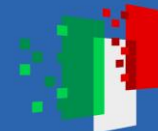
SISTEMA DI RAFFREDDAMENTO (3)

- Un'altra tecnica per il raffreddamento è l'uso di sistemi attivi [18]:
 - fanno uso di pompe e ventilatori;
 - impiegano specifici fluidi di raffreddamento (aria, acqua, olio, nanofluidi, ...);
 - hanno elevata capacità di raffreddamento;
 - si usano nei sistemi HCPV;
 - richiedono energia elettrica per la circolazione del fluido;
 - comportano disuniformità di temperatura nell'area della cella.

Efficacia di un sistema di raffreddamento a circolazione d'acqua [18].

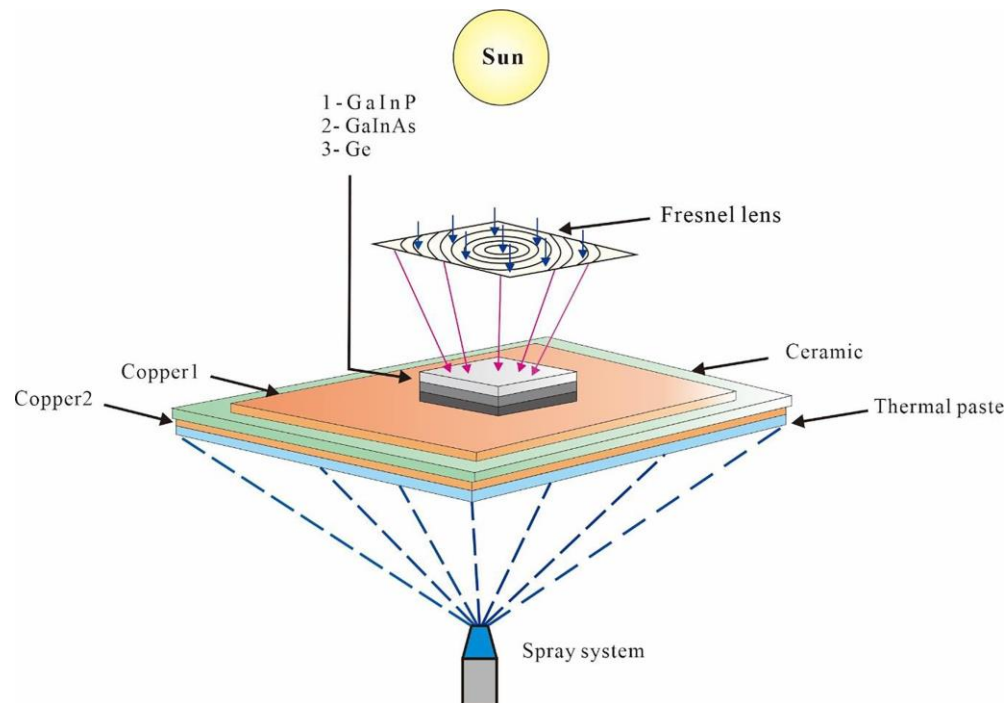
- $P_{irr} = 1 \text{ kW/m}^2$;
- flusso d'acqua sulla superficie superiore = 4 l/min.





SISTEMA DI RAFFREDDAMENTO (4)

- Per migliorare le prestazioni sono state sviluppate diverse tecniche di raffreddamento:
- Esempio di sistema di raffreddamento attivo con tecnica spray [19]:
 - Sistema di raffreddamento con tecnica ibrida (attiva + passiva) [20, 21, 22, 23, 24]:
 - circolazione di nanofluidi e PCM;
 - circolazione d'acqua e PCM con dissipatore;
 - circolazione di nanofluidi e PCM con dissipatore;
 - circolazione di nanofluidi con raffreddatore termoelettrico;
 - altri.





Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA

NEST
NETWORK FOR ENERGY SUSTAINABLE TRANSITION

ESEMPIO DI SISTEMA CPV

- Sistema a concentrazione a disco EURODish - Plataforma Solar de Almeria in Spain



Concentrator

Diameter	8.5 m
Projected area	56.7 m ²
Focal Length	4.5 m
Average concentration factor	2500
Reflectivity	94 %

Tracking and Control

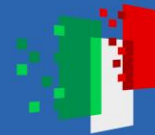
Suspension	azimuth
Stow position	face down
max. allowable wind velocity during operation	65 km/h
Survival wind velocity in stow position	160 km/h
Drive	servo motor
Drive velocity	60 °/min.
Control system	PC, micro controller
Data transfer	InterBus-S
Remote control	telephone / WWW



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca

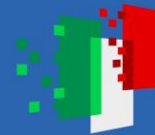


Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA

NEST
NETWORK FOR ENERGY SUSTAINABLE TRANSITION

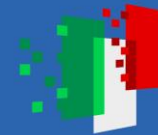
RINGRAZIAMENTI

- Questo lavoro è stato svolto all'interno del Progetto "Network 4 Energy Sustainable Transition – NEST", code PE0000021, CUP B73C22001280006, Spoke 1, finanziato dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), Mission 4, dell'Unione Europea – NextGenerationEU.
- Si ringrazia l'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Palermo per aver reso possibile lo sviluppo di questo seminario di disseminazione quale attività per il WP 1.7 – Spoke 1 del Progetto NEST.



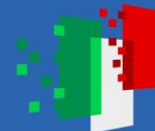
BIBLIOGRAFIA

- [1] J. Gray: "The physics of solar cell", in A. Luque e S. Hegedus eds. "Handbook of photovoltaic science and engineering", Wiley, London, 2003.
- [2] Working Group 3 "Science, Technology and Applications" of the EU PV Technology Platform: "A Strategic Research Agenda for Photovoltaic Solar Energy Technology", PhotoVoltaic Technology Platform.
- [3] M. M. Alzahrani et al.: "Record high solar concentration ratio for photovoltaics: Experimental validation for achieving effective concentration of >1200 suns", Solar Energy 271 (2024).
- [4] S. El Himer et al.: "Photovoltaic Concentration: Research and Development", Energies, 13, 2020.
- [5] Y. Zou et al.: "Concentrating photovoltaic systems: a review of temperature effects and components", Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 149, 2024.
- [6] K. Awasthi et al.: "Design of Fresnel lens with spherical facets for concentrated solar power applications", International Journal of energy research, 44, 2020.



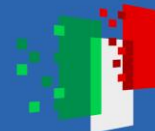
BIBLIOGRAFIA (2)

- [7] G. Wang et al.:“Experimental and optical performances of a solar CPV device using a linear Fresnel reflector concentrator”, Renew Energy, 146, 2020.
- [8] K. H. Kumar et al.:“Solar parabolic dish collector for concentrated solar thermal systems: a review and recommendations”, Environmental Science and Pollution Research, 29, 2022.
- [9] A. Z. Hafez et al.“Design analysis factors and specifications of solar dish technologies for different systems and applications”, Renewable and Sustainable Energy Reviews 67, 2017.
- [10] Y. Amanlou et al.:“A comprehensive review of Uniform Solar Illumination at Low Concentration Photovoltaic (LCPV) Systems”, Renewable and Sustainable Energy Reviews 60, (2016).
- [11] D. I. Paul:“Application of compound parabolic concentrators to solar photovoltaic conversion: A comprehensive review”, International Journal of Energy research, 43, 2019.
- [12] K. B. de Melo et al.:“Influence of solar position calculation methods applied to horizontal single-axis solar trackers on energy generation Energies”, 13, 2020.



BIBLIOGRAFIA (3)

- [13] H. Fathabadi: "Comparative study between two novel sensorless and sensor based dual-axis solar trackers" Sol Energy, 138, 2016.
- [14] A. Awasthi et al.: "Review on sun tracking technology in solar PV system", Energy reports, 6, 2020.
- [15] M. Gharzi et al.: "Progressive cooling technologies of photovoltaic and concentrated photovoltaic modules: A review of fundamentals, thermal aspects, nanotechnology utilization and enhancing performance", Solar energy, 211, 2020.
- [16] Q. Luo et al.: "Experimental investigation on the heat dissipation performance of flared-fin heat sinks for concentration photovoltaic Modules", Appl. Therm. Eng., 157, 2019.
- [17] R. El Kassr et al.: "Phase change materials for enhanced photovoltaic panels performance: A comprehensive review and critical analysis", Energy and Built Environment, in press.
- [18] S. Sargunanathan et al.: "Performance enhancement of solar photovoltaic cells using effective cooling methods: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 64, 2016.



BIBLIOGRAFIA (4)

- [19] S. Jowkar et al.:“Numerical analysis in thermal management of high concentrated photovoltaic systems with spray cooling approach: A comprehensive parametric study”, Solar Energy, 250, 2023.
- [20] E. B. Agyekum et al.:“Experimental study on performance enhancement of a photovoltaic module using a combination of phase change material and aluminum fins—exergy, energy and economic (3E) analysis ”, Invention, 6, 2021.
- [21] Y. Li et al.:“Comparative study on cooling method for concentrating photovoltaic system“, Energy, 253, 2022.
- [22] A. Kouravand et al.:“Evaluation of a nanofluid-based concentrating photovoltaic thermal system integrated with finned PCM heatsink: an experimental study”, Renew Energy, 201, 2022.
- [23] A. Lekbir et al.:“Energy performance investigation of nanofluid-based concentrated photovoltaic/thermal-thermoelectric generator hybrid system“, Int. J. Energy Res. 45, 2021.
- [24] P. M. Rodrigo et al.:“Performance and economic limits of passively cooled hybrid thermoelectric generator-concentrator photovoltaic modules“, Appl. Energy, 238, 2019.