



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



RICERCA DI  
SISTEMA ELETTRICO



Ministero dell'Ambiente  
e della Sicurezza Energetica



Politecnico  
di Torino



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
FIRENZE



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI  
FEDERICO II



Università  
degli Studi  
di Palermo



TOR VERGATA  
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA

# Coating innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti CSP a collettori lineari e superfici riflettenti autopulenti con sensoristica integrata per impianti CSP

Progetto 1.9 “Solare termodinamico” - AdP MASE-ENEA, PTR 2022-2024

Centro Congressi “Roma Eventi – Fontana di Trevi” - Roma, 29 gennaio 2024

Dott.<sup>ssa</sup> Anna Castaldo, Ing. Salvatore Esposito

ENEA - Dipartimento “Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili” - Divisione “Solare Termico, Termodinamico e Smart Network”



1101 0110 1100  
0101 0010 1101  
0001 0110 1110  
1101 0010 1101  
1111 1010 0000



- ❖ **Linea di ricerca: “Coating innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti CSP a collettori lineari”**
- ❖ **Linea di ricerca: “Superfici riflettenti autopulenti con sensoristica integrata per impianti CSP”**

- ❖ **Linea di ricerca: “Coating innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti CSP a collettori lineari”**
- ❖ Linea di ricerca: “Superfici riflettenti autopulenti con sensoristica integrata per impianti CSP”

# Tematica: “Materiali e componenti avanzati per impianti CSP”

**Linea di ricerca: “Coating innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti CSP a collettori lineari”**



TRL iniziale: 4

TRL finale: 7

- Sviluppo e realizzazione in forma di prototipo, mediante processi di sputtering d'interesse industriale (alta produttività, basso costo), di un coating per tubi ricevitori evacuati di impianti micro-PTC operanti a media T ( $\leq 350$  °C), con elevate prestazioni fototermiche ( $\alpha_s > 96\%$ ,  $\varepsilon_{th} < 7.5\%$  a 350 °C) e stabile per vita utile  $\geq 25$  anni
- Sviluppo e realizzazione in forma di prototipo, mediante processi di sputtering d'interesse industriale (alta produttività, basso costo), di un coating per tubi ricevitori evacuati di impianti CSP (PTC e LFC di grande taglia) operanti ad alta T ( $\leq 550$  °C), con prestazioni fototermiche ( $\alpha_s > 95.10\%$ , e  $\varepsilon_{th} < 8.50\%$  a 550 °C) incrementate rispetto allo stato dell'arte e stabile per vita utile  $\geq 25$  anni

# Tematica: “Materiali e componenti avanzati per impianti CSP”

**Linea di ricerca: “Coating innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti CSP a collettori lineari”**



TRL iniziale: 4  
TRL finale: 7

- Sviluppo di materiali e processi di deposizione di tipo sputtering per la realizzazione di un coating per tubi ricevitori di impianti micro-PTC operanti a media T ( $\leq 350$  °C) con elevate prestazioni fototermiche ( $\alpha_s > 96\%$ ,  $\varepsilon_{th} < 7.5\%$  a 350 °C) e stabile per vita utile  $\geq 25$  anni
- Sviluppo di materiali e processi di deposizione di tipo sputtering per la realizzazione di un coating per tubi ricevitori di impianti CSP (PTC e LFC di grande taglia) operanti ad alta T ( $\leq 550$  °C), con prestazioni fototermiche ( $\alpha_s > 95.10\%$ , e  $\varepsilon_{th} < 8.50\%$  a 550 °C) incrementate rispetto allo stato dell'arte e stabile per vita utile  $\geq 25$  anni

# Tematica: “Materiali e componenti avanzati per impianti CSP”

**Linea di ricerca: “Coating innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti CSP a collettori lineari”**



TRL iniziale: 4  
TRL finale: 7

- Sviluppo di materiali e processi di deposizione di tipo sputtering per la realizzazione di un coating per tubi ricevitori di impianti micro-PTC operanti a media T ( $\leq 350$  °C) con elevate prestazioni fototermiche ( $\alpha_s > 96\%$ ,  $\varepsilon_{th} < 7.5\%$  a 350 °C) e stabile per vita utile  $\geq 25$  anni
- Sviluppo di materiali e processi di deposizione di tipo sputtering per la realizzazione di un coating per tubi ricevitori di impianti CSP (PTC e LFC di grande taglia) operanti ad alta T ( $\leq 550$  °C), con prestazioni fototermiche ( $\alpha_s > 95.10\%$ , e  $\varepsilon_{th} < 8.50\%$  a 550 °C) incrementate rispetto allo stato dell'arte e stabile per vita utile  $\geq 25$  anni

# Sviluppo di materiali e processi di deposizione per coating innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti micro-PTC a media temperatura

- ✓ 2011: brevetto ENEA di un coating solare con riflettore a Infrarosso in Ag e cermet a doppio nitruro per applicazioni in vuoto a media temperatura ( $\leq 400$  °C)
- ✓ Trasferimento all'industria nazionale (ASE) del brevetto ENEA per realizzare tubi ricevitori operanti a media temperatura ( $\leq 400$  °C)
- ✓ 2016-2017: tubi ricevitori montati sull'impianto CSP DUBA-1 in Arabia Saudita – Impianto ad olio diatermico da 43 MWe



*Coating solare per tubi ricevitori evacuati a 400 °C*



*Impianto CSP DUBA-1 (Arabia Saudita)*

# Sviluppo di materiali e processi di deposizione per coating innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti micro-PTC a media temperatura



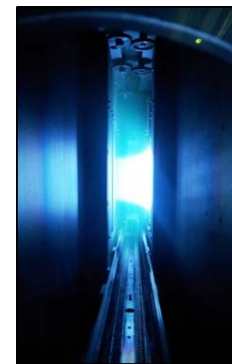
*Tubo porta-substrati di diametro 70 mm (sx) e tubo porta-substrati di diametro 10 mm (dx)*

- ✓ Modifiche effettuate sull'impianto di sputtering ENEA-2 per realizzare i coating dei tubi ricevitori evacuati dell'impianti micro-PTC UniFI
- ✓ Individuazione dei parametri di processo ottimali per realizzare i materiali del coating innovativo con riflettore a infrarosso in Ag e cermet a doppio nitruro stabile in vuoto a 350 °C



*Impianto di sputtering ENEA-2*

- ✓ Realizzazione di un coating solare per i 350 °C dalle prestazioni fototermiche non ottimizzate
- ✓ Annealing termici accelerati in vuoto per stimare la stabilità a 350 °C del coating realizzato
- ✓ Attività futura: realizzazione di un prototipo di coating operante a media T ( $\leq 350$  °C) con  $\alpha_s > 96\%$ ,  $\epsilon_{th} < 7.5\%$  a 350 °C



*Immagine del plasma*



# Tematica: “Materiali e componenti avanzati per impianti CSP”

**Linea di ricerca: “Coating innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti CSP a collettori lineari”**



TRL iniziale: 4  
TRL finale: 7

- Sviluppo di materiali e processi di deposizione di tipo sputtering per la realizzazione di un coating per tubi ricevitori di impianti micro-PTC operanti a media T ( $\leq 350$  °C) con elevate prestazioni fototermiche ( $\alpha_s > 96\%$ ,  $\varepsilon_{th} < 7.5\%$  a 350 °C) e stabile per vita utile  $\geq 25$  anni
- Sviluppo di materiali e processi di deposizione di tipo sputtering per la realizzazione di un coating per tubi ricevitori di impianti CSP (PTC e LFC di grande taglia) operanti ad alta T ( $\leq 550$  °C), con prestazioni fototermiche ( $\alpha_s > 95.10\%$ , e  $\varepsilon_{th} < 8.50\%$  a 550 °C) incrementate rispetto allo stato dell'arte e stabile per vita utile  $\geq 25$  anni

# Sviluppo di materiali e processi di deposizione per coating innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti CSP ad alta temperatura

- ✓ 2011: brevetto ENEA di un coating solare con riflettore a infrarosso in W e cermet a doppio nitruro per applicazioni in vuoto ad alta temperatura ( $\leq 550$  °C)
- ✓ Trasferimento all'industria nazionale (ASE) del brevetto ENEA per realizzare tubi ricevitori operanti ad alta temperatura ( $\leq 550$  °C)
- ✓ 2015-2016: tubi ricevitori montati sull'impianto di CSP AKESAI in Cina – Impianto a sali fusi da 55 MWe
- ✓ 2018: tubi ricevitori montati sull'impianto CSP dimostratore MATS in Egitto – Impianto a sali fusi da 1 MWe
- ✓ 2022: tubi ricevitori montati sull'impianto CSP dimostratore di Partanna in Italia – Impianto a sali fusi da 4.26 MWe



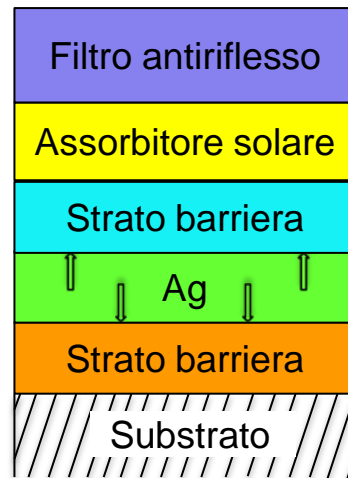
*Coating solare per tubi ricevitori evacuati a 550 °C*



*Impianto CSP AKESAI (Cina)*

# Sviluppo di materiali e processi di deposizione per coating innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti CSP ad alta temperatura

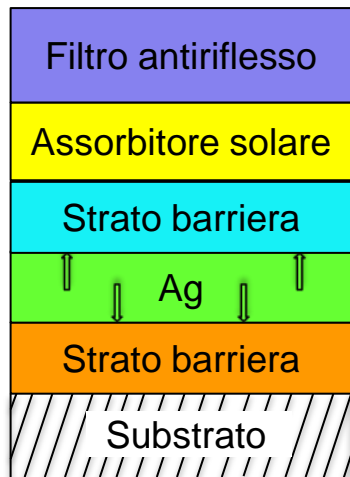
- ✓ Incrementare rispetto allo stato dell'arte le prestazioni fototermiche dei coating per l'alta temperatura assicurando una stabilità  $\geq 25$  anni significa dover abbandonare il riflettore Infrarosso di W che è tipicamente caratterizzato da valori di emissività termica non particolarmente bassi a causa delle sue proprietà intrinseche di riflettanza nell'Infrarosso
- ✓ Soluzioni alternative che prevedono l'impiego di metalli con proprietà di riflettanza più alte nell'infrarosso, come ad esempio l'Ag, si sono dimostrate non perseguibili a causa dell'instabilità di questi metalli alle alte temperatura di esercizio
- ✓ Sviluppo di materiali e strutture in grado di stabilizzare il riflettore d'Ag fino a 550 °C
- ✓ Realizzazione di una serie di coating in cui il riflettore di Ag è inserito tra due strati dalla funzione di barriera rispetto alla diffusione dell'Ag



# Sviluppo di materiali e processi di deposizione per coating innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti CSP ad alta temperatura

## Materiali barriera

1. Barriera di W tra il substrato e il riflettore d'Ag
2. Barriera di tipo cermet o di tipo ceramico tra il riflettore d'Ag e l'assorbitore solare



Materiali Barriera	Condizioni di processo
CERMET W-AIN	Bassa potenza di W
CERMET W-AIN	Media potenza di W
AIN	Basso flusso di N <sub>2</sub>
AIN	Alto flusso di N <sub>2</sub>
SiN <sub>x</sub>	Basso flusso di N <sub>2</sub>
SiN <sub>x</sub>	Medio flusso di N <sub>2</sub>
SiN <sub>x</sub>	Alto flusso di N <sub>2</sub>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Basso flusso di O <sub>2</sub>

# Sviluppo di materiali e processi di deposizione per coating innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti CSP ad alta temperatura

- ✓ Realizzazione di una serie di coating dai parametri fototermici non ottimizzati per testare l'efficacia delle diverse barriere sviluppate
- ✓ Annealing termici accelerati in vuoto dei coating per individuare le strutture più idonee a stabilizzare l'Ag fino alla temperatura di 550 °C in modo che il coating risultante avesse una vita utile di 25 anni
- ✓ Migliori barriere tra l'Ag e l'assorbitore solare:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , AlN
- ✓ Attività futura: realizzazione di un prototipo di coating operante ad alta T ( $\leq 550$  °C) con  $\alpha_s > 95.10\%$ , e  $\epsilon_{th} < 8.50\%$  a 550 °C e stabile per vita utile  $\geq 25$  anni



- ❖ Linea di ricerca: “Coating innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti CSP a collettori lineari”
- ❖ **Linea di ricerca: “Superfici riflettenti autopulenti con sensoristica integrata per impianti CSP”**

# Tematica: “Materiali e componenti avanzati per impianti CSP”

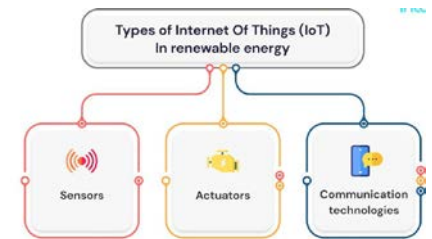
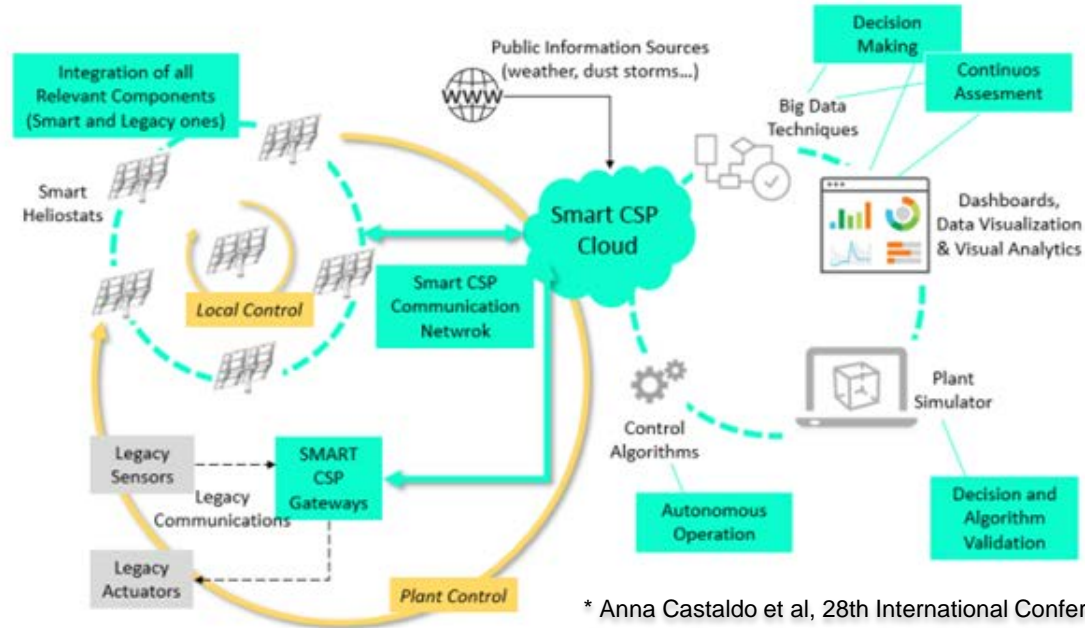


- ❖ **Contesto della ricerca di settore**
- ❖ **Presentazione attività di ricerca «Superfici riflettenti autopulenti con sensoristica integrata per impianti CSP»**
- ❖ **Risultati intermedi**



# La digitalizzazione del CSP

Nel mercato dell'energia colossi come **Schneider Electric, Siemens, Bosch, GE, ABB, Honeywell** si muovono verso il business digitale. In considerazione del fatto che la frontiera del settore CSP è la **digitalizzazione** degli impianti, le aziende produttrici di componenti per impianti CSP e Centri di Ricerca sono interessate alla "smartizzazione" del campo solare (per monitorarne il funzionamento, lo sporcamento, razionalizzare gli interventi di ordinaria manutenzione, etc.), hanno depositato brevetti e lavorano allo sviluppo di sensori, attuatori e tecnologie di comunicazione.

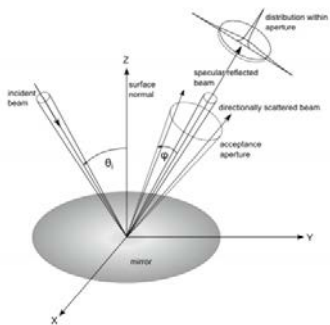


**SMARTIZZAZIONE del RIFLETTORE SOLARE**  
Lo specchio «parlante»\*

\* Anna Castaldo et al, 28th International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems, SolarPACES 2022  
Sensing Properties of Metamaterials Utilized as Self-Cleaning Coating for Solar Mirrors  
Towards the "Talking Mirror", Advanced Materials, Manufacturing, and Components  
<https://doi.org/10.52825/solarpaces.v1i.667>

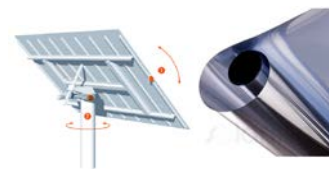


I concentratori ottici sono **SUPERFICI RIFLETTENTI** adoperate nei collettori solari per **RIDIRIGERE** la luce del sole su una superficie ricevitrice. L'elemento concentratore attivo è lo **SPECCHIO SOLARE** supportato da una struttura che ne mantiene la forma, entrambi costituiscono il **RIFLETTORE**. La qualità di questo riflettore nei sistemi CSP influenza direttamente l'ammontare di radiazione che può essere trasformata in Potenza (1% di minore riflettanza significa 1.2% perdita in efficienza).

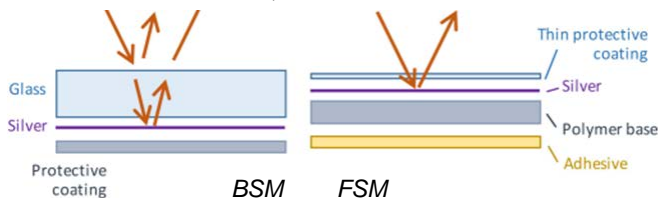


$$\rho_{\lambda,\phi}(\lambda, \theta_i, \phi) = \rho_{\lambda,h}(\lambda, \theta_i, h) \cdot \left[ 1 - \sum_{j=1}^M K_j \exp \left[ \frac{-\phi^2}{2\sigma_j^2(\lambda, \theta)} \right] \right]$$

Riflettanza emisferica ponderata solare dipende dalla lunghezza d'onda,  $\lambda$ , dall'angolo di incidenza,  $\theta_i$ , tra la luce che arriva e la normale alla superficie dello specchio, dalla polarizzazione della luce, dall'angolo di accettazione,  $\phi$ .



Piani, curvi con una curvatura monodimensionale come nei parabolic trough, curvi con una curvatura bidimensionale come nei dischi parabolici



Un impianto CSP raffreddato a secco richiede :

- 0.3 m<sup>3</sup> /MWh
- 120L per m<sup>2</sup> di superficie riflettente
- 30L per m<sup>2</sup> impianto solare installato

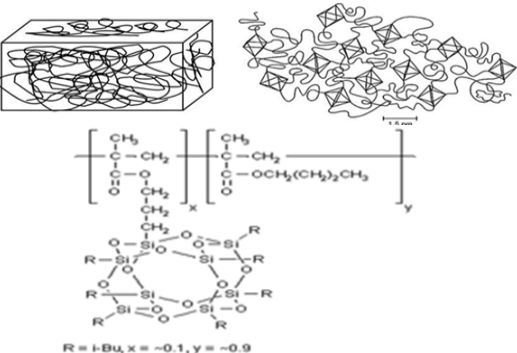
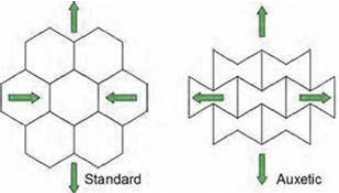
# Progetto Solare termodinamico 1.9 – PTR 2019-2021

Sviluppate, in forma di prototipo su scala da laboratorio, 2 piattaforme per fabbricare rivestimenti a film sottile idonei a superfici riflettenti di diversa architettura, che consentono di rendere le “superfici riflettenti autopulenti” (ovvero di mitigarne lo sporcammento e limitare il consumo di acqua di lavaggio).

## METAMATERIALI auxetici con proprietà ottiche

- 1. **2D Politiroidi del nitruro di alluminio (AlN)** fabbricati attraverso la tecnica dello sputtering reattivo \*
- 2. **Polimeri ibridi nanostrutturati** depositati sulla scala laboratoriale attraverso lo spinning e sulla scala preindustriale attraverso lo spray e/o stampa.

Che risultano entrambi trasparenti, idrofobici e versatili (cioè idonei sia a specchi BSM che FSM)



*E' possibile integrare nuove funzionalità nel rivestimento autopulente?*

## Sfide

Rendere disponibili rivestimenti autopulenti, con possibilità d'integrazione di sensori di sporcammento/failure, idonei per specchi solari di dimensioni reali  
→ Contenimento dei costi di O&M del campo solare degli impianti CSP.

\* Castaldo et al, Alluminium nitride doping for solar mirrors coatings, *Energies* 14(20), 2021, DOI: [10.3390/en14206668](https://doi.org/10.3390/en14206668)

# “Superfici riflettenti con sensoristica integrata per impianti CSP”

Linee di attività
Ottimizzazione dei metodi di fabbricazione di nanocompositi ibridi a bagnabilità modulabile idonei alla realizzazione di prototipi di specchi autopulenti di dimensioni reali.
Realizzazione e caratterizzazione di un prototipo di specchio solare dotato di un innovativo rivestimento autopulente predisposto all'integrazione di idonea sensoristica.
Fabbricazione, attraverso tecniche economiche e scalabili, di sensori piezoelettrici e/o resistivi e loro integrazione negli specchi autopulenti.

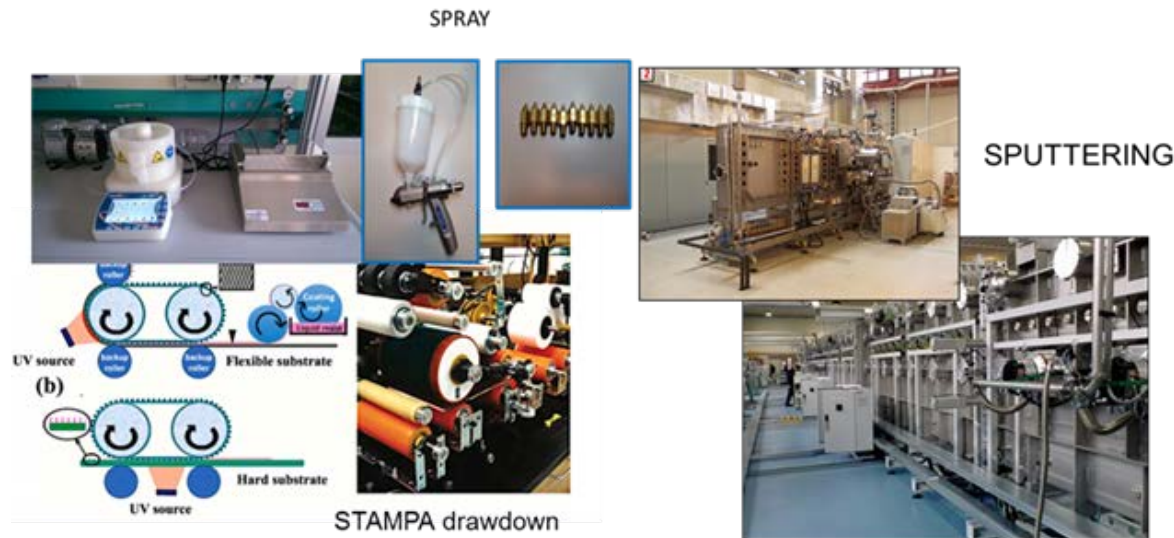
## Obiettivi specifici

La linea di ricerca si configura come evoluzione all'analogia linea del Progetto 1.9 / PTR 2019-2021, prevedendo come obiettivi specifici:

- **Scaling-up** delle migliori soluzioni sviluppate e/o di nuove formulazioni per superfici autopulenti, passando da una scala di prototipo di laboratorio a una di dimensioni compatibili con specchi d'impianti reali, con l'ambizione di messa a punto di processi per eventuale retro-fitting di campi solari esistenti.
- Conferimento al rivestimento autopulente di **proprietà autodiagnostiche** dello stato di funzionamento dello specchio solare (sporco, eventuale failure delle performance ottiche, orientazione degli specchi, misura delle condizioni ambientali locali, ecc.) mediante l'inserimento nelle formulazioni autopulenti di filler in grado di esplicitare proprietà sensoristiche.

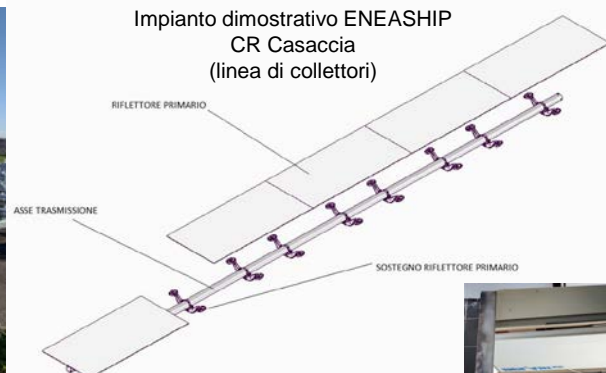
Ottimizzazione dei metodi di fabbricazione di nanocompositi ibridi a bagnabilità modulabile idonei alla realizzazione di prototipi di specchi autopulenti di dimensioni reali.

## SCALING UP *dal laboratorio alla scala pre-industriale*



DELIVERABLE della linea di attività: REPORT TECNICO “Materiali e componenti avanzati per impianti CSP - Ottimizzazione dei metodi di fabbricazione di nanocompositi ibridi a bagnabilità modulabile idonei alla realizzazione di prototipi di specchi autopulenti di dimensioni reali”

# Schemi di integrazione



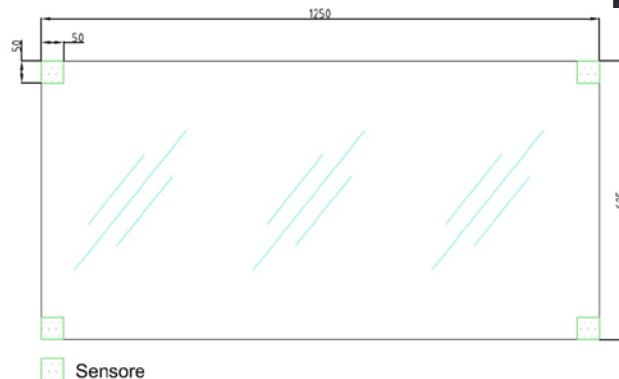
## REQUISITI

**Dimensionali:** 1250mm x625 mm  
**Prestazionali:** Differenza di riflettanza < 8%  
WCA°>90°



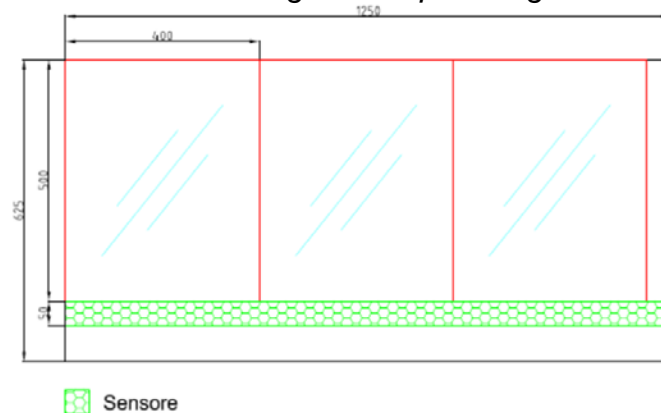
## Rivestimenti polimerici

Stampa  
drawdown, HVLP  
spray



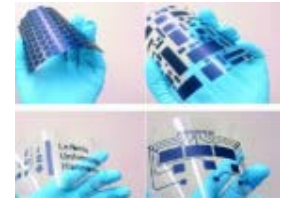
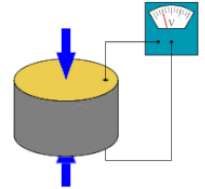
## Rivestimenti inorganici

Magnetron sputtering

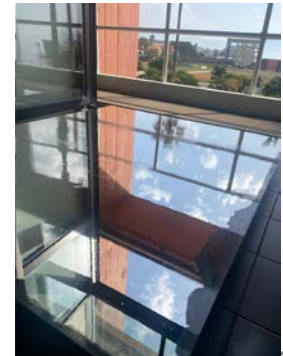


# Realizzazione e caratterizzazione di un prototipo di specchio solare dotato di un innovativo rivestimento autopulente predisposto all'integrazione di idonea sensoristica

- Deposizione del rivestimento polimerico su specchi di eliostato 2m<sup>2</sup> e deposizione su tre specchi dell'impianto prototipale (n.1 polimerico, n.2 politipoide AlN modulare).



- Posizionamento di due prototipi nel campo solare ENEA SHIP di Casaccia e prime misure outdoor.
- Studio preliminare di materiali/formulazioni/metodi per ottenere SENSORI.
- Acquisizione di strumentazione idonea a caratterizzare le proprietà elettriche dei materiali al fine di progettare l'architettura del dispositivo SENSORE (prevista consegna ed installazione di 4200 A\_ SCS Parameter analyzer nel mese di febbraio 2024).



# Realizzazione e caratterizzazione di un prototipo di specchio solare dotato di un innovativo rivestimento autopulente predisposto all'integrazione di idonea sensoristica

## OUTPUT

✓ Prototipo di superficie riflettente autopulente di dimensioni compatibili con impianti solari sperimentali, predisposta all'integrazione di sensori con  $WCA > 90^\circ$  e alta trasparenza nel range solare ( $\Delta R\%_{\text{specchi}} < 8\%$ ).

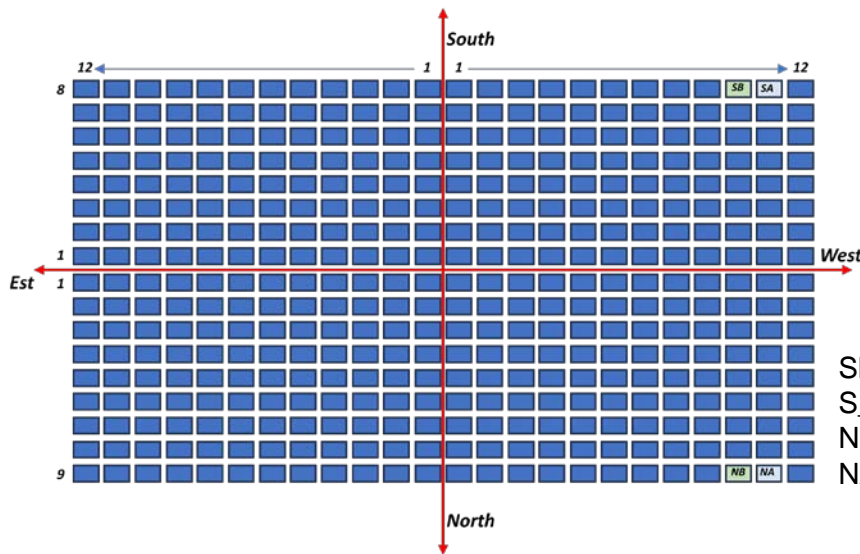
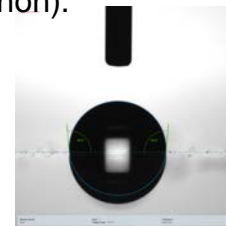
- Report: «Realizzazione e caratterizzazione di un prototipo di specchio solare dotato di un innovativo rivestimento autopulente predisposto all'integrazione di idonea sensoristica»

Specchio trattato



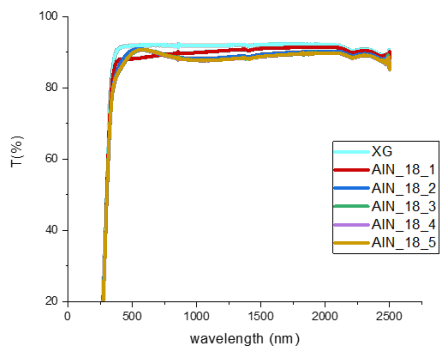
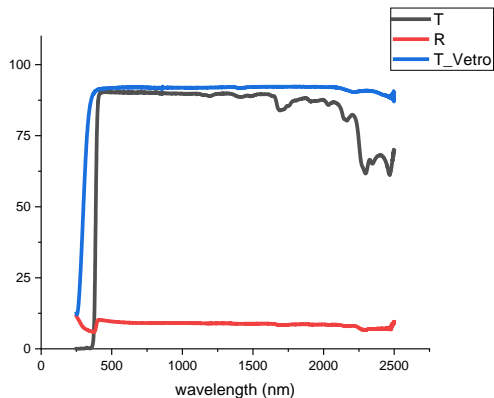
# Misure Sperimentali

La caratterizzazione delle proprietà ottiche nell'intero range spettrale è eseguita con uno spettrofotometro (T% rivestimento su vetro 10x10cm), in campo con un riflettometro portatile (R% a 661nm su specchi rivestiti e non).



WCA (NA)= $93.7 \pm 1.4^\circ$   
WCA (S\_AIN)= $93.0 \pm 3^\circ$

SB: Specchio riferimento Sud  
S\_AIN: Specchio con politipoidi di AIN  
NB: Specchio riferimento Nord  
NA\_pol: Specchio con polimero



S_AIN	SB	NA_pol	NB
92.99±0.12 %	95.57±0.07%	93.4±0.5%	95.24±0.08%



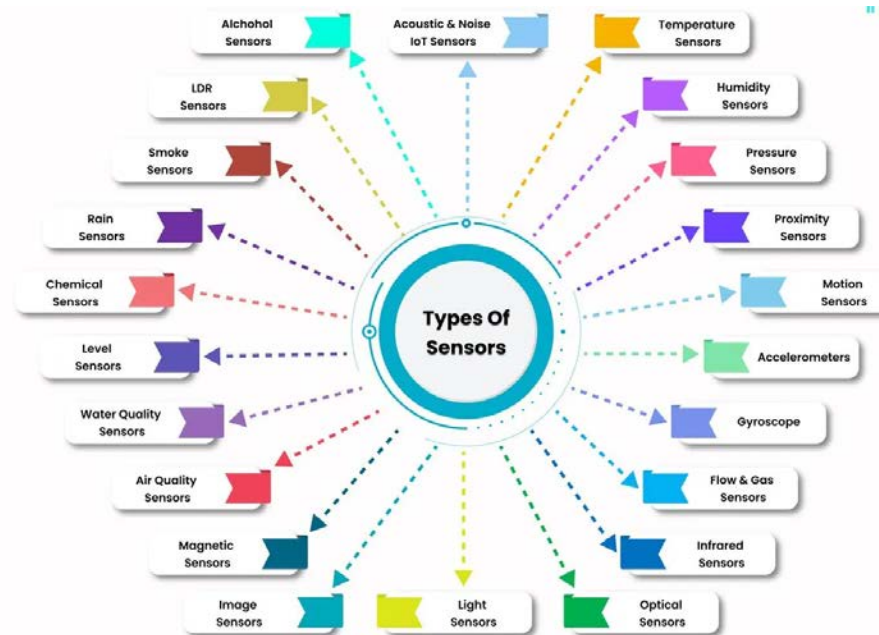
# Fabbricazione, attraverso tecniche economiche e scalabili, di sensori piezoelettrici e/o resistivi e loro integrazione negli specchi autopulenti

## Risultati attesi

- Report: “Materiali e componenti avanzati per impianti CSP - Fabbricazione, attraverso tecniche economiche e scalabili, di sensori piezoelettrici e/o resistivi e loro integrazione negli specchi autopulenti” (Dicembre 2024).

- Prototipo di sensore, su scala laboratoriale (5x5 cm), integrabile in rivestimenti autopulenti per specchi solari.

Per nanocompositi conduttivi, la prestazione target è in termini di resistività ( $\rho$ ):  $\rho < 10^5 \Omega\text{cm}$ . In caso di prototipo di sensore costituito da materiali piezoelettrici, la prestazione target è in termini di coefficiente piezoelettrico ( $d_{33}$ ):  $d_{33} > 1 \text{ pm/V}$ .



**Dott.ssa Anna Castaldo**

*[anna.castaldo@enea.it](mailto:anna.castaldo@enea.it)*

**Ing. Salvatore Esposito**

*[salvatore.esposito@enea.it](mailto:salvatore.esposito@enea.it)*



Solar Coatings:  
Materials,  
Characterizations  
and Applications

**Guest Editor**  
Dr. Anna Castaldo

**Deadline**  
20 June 2023

**Special** Issue  
Invitation to submit



Take a look and contribute to the Special Issue of Applied Science/MDPI/"Solar Coatings: Materials, Characterizations and Applications"

[https://www.mdpi.com/journal/applsci/special\\_issues/R94C619205](https://www.mdpi.com/journal/applsci/special_issues/R94C619205)