

# Ricerca di Sistema elettrico



Materiali e componenti avanzati per impianti CSP-  
Realizzazione e caratterizzazione di un prototipo di specchio  
solare dotato di un innovativo rivestimento autopulente  
predisposto all'integrazione di idonea sensoristica (LA1.8)

Anna Castaldo, Emilia Gambale, Giuseppe Vitiello, Giuseppe Cara

Materiali e componenti avanzati per impianti CSP - Realizzazione e caratterizzazione di un prototipo di specchio solare dotato di un innovativo rivestimento autopulente predisposto all'integrazione di idonea sensoristica (LA1.8)

A. Castaldo, E. Gambale, G. Vitiello, G. Cara (ENEA)

Dicembre 2023

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto: 1.9 "Solare termodinamico"

Linea di attività: LA1.8

Responsabile del Progetto: Antonio Guglielmo, ENEA

Responsabile del Work Package: Antonio Guglielmo, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Anna Castaldo, ENEA

Mese inizio previsto: 13

Mese inizio effettivo: 13

Mese fine previsto: 24

Mese fine effettivo: 24

## Indice

|     |                                                                                                                                         |    |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1   | Risultati attesi .....                                                                                                                  | 4  |
| 2   | Risultati ottenuti.....                                                                                                                 | 5  |
| 3   | Prodotti attesi .....                                                                                                                   | 6  |
| 4   | Prodotti sviluppati .....                                                                                                               | 7  |
| 5   | Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....                                                                                  | 8  |
| 6   | Sintesi delle attività svolte .....                                                                                                     | 9  |
| 7   | Dettaglio delle attività svolte.....                                                                                                    | 10 |
| 7.1 | Fabbricazione.....                                                                                                                      | 10 |
| 7.2 | Installazione degli specchi rivestiti in campo.....                                                                                     | 12 |
| 7.3 | Campagna sperimentale di caratterizzazione delle prestazioni in campo .....                                                             | 14 |
| 7.4 | Individuazione di formulazioni nano-composite ibride con potenzialità autodiagnostiche interrogabili nei rivestimenti autopulenti. .... | 16 |
| 7.5 | Messa a punto di un metodo per stimare il consumo di acqua di lavaggio di rivestimenti autopulenti per specchi solari .....             | 18 |
| 8   | Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....                                                                | 20 |
| 9   | Pubblicazioni scientifiche .....                                                                                                        | 21 |
| 10  | Eventi di disseminazione .....                                                                                                          | 22 |

## Indice delle figure

|                                                                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Incollaggio degli specchi in officina meccanica.....                                                                                                                       | 11 |
| Figura 2 - L'infrastruttura sperimentale "ENEA-SHIP" è stata realizzata nell'ambito del Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 per la Ricerca di Sistema Elettrico nazionale..... | 12 |
| Figura 3 - Schema dell'impianto ENEA SHIP. Si evidenziano i punti i cui sono stati installati gli specchi trattati e gli specchi controllo. ....                                      | 13 |
| Figura 4 - Specchio solare SA: Definizione dei punti di misura periodici. ....                                                                                                        | 13 |
| Figura 5 - Specchi installati in campo nell'area sud. ....                                                                                                                            | 13 |
| Figura 6 - Specchi installati in campo nell'area nord. ....                                                                                                                           | 14 |
| Figura 7 - Confronto tra i due specchi di riferimento collocati in aree diverse del campo solare. ....                                                                                | 14 |
| Figura 8 - Misure di riflettanza degli specchi disposti a N_O. In arancione lo specchio rivestito di polimero e in blu lo specchio di riferimento. ....                               | 15 |
| Figura 9 - Confronto tra le performance percentuali di riflettanza tra lo specchio con rivestimento di politipoide di AIN SA e specchio non trattato SB .....                         | 15 |
| Figura 10 - Schema a blocchi della procedura di bagnatura. ....                                                                                                                       | 19 |

## Indice delle tabelle

|                                                                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabella 1 - Misura delle performance degli specchi installati in campo. ....                                                                                             | 11 |
| Tabella 2 - Seconda campagna di acquisizione di misure di R (%) di uno specchio rivestito con politipoide di AIN (NA) e lo specchio substrato. ....                      | 16 |
| Tabella 3 - Riepilogo dei parametri utilizzati nella stima dei costi di sensorizzazione dell'impianto "ENEA-SHIP" mediante sistemi piezoelettrici collocati ex-post..... | 17 |
| Tabella 4 - Misure di WCA e acqua di lavaggio effettuate mediante la procedura su indicata su superfici inorganiche. ....                                                | 19 |

## 1 Risultati attesi

I risultati attesi dalla presente linea di attività LA1.8 riguardano la fabbricazione di uno specchio solare autopulente di dimensioni reali, predisposto ad integrare proprietà sensoristiche /antistatiche nel rivestimento, la sua installazione e caratterizzazione in campo sull'impianto solare sperimentale "ENEA-SHIP" del C.R. ENEA di Casaccia. Al contempo, è prevista un'attività su scala laboratoriale per ideare nuove formulazioni con requisiti aggiuntivi che consentano al rivestimento autopulente di fornire informazioni sul livello di sporco, allo scopo di razionalizzare gli interventi di lavaggio e ridurre il consumo di acqua. Si attende una valutazione di compatibilità di materiali e processi in vista della realizzazione, con tecniche economiche e scalabili, nella successiva linea di attività LA1.9, di piccoli dispositivi sensori integrabili su specchi solari.

## 2 Risultati ottenuti

Sono stati ottenuti i seguenti risultati previsti dal progetto:

- Fabbricazione di un prototipo di specchio autopulente ottenuto attraverso la tecnica dello sputtering reattivo (prototipo 1)
- Installazione del prototipo 1 presso l'impianto Fresnel "ENEA-SHIP" del C.R. ENEA di Casaccia.
- Caratterizzazione in campo delle prestazioni del prototipo.
- Individuazione di formulazioni nano-composite ibride con potenzialità autodiagnostiche integrabili nei rivestimenti autopulenti.

Sono stati, inoltre, ottenuti i seguenti risultati non previsti dal capitolato:

- Fabbricazione di un secondo prototipo di specchio autopulente mediante tecnica spray (prototipo 2).
- Installazione del prototipo 2 presso l'impianto Fresnel "ENEA-SHIP" del C.R. ENEA di Casaccia.
- Caratterizzazione delle prestazioni del prototipo.
- Messa a punto di un metodo per stimare il consumo di acqua di lavaggio di rivestimenti autopulenti per specchi solari.

Il conseguimento di siffatti risultati si configura come beneficio per il sistema elettrico nazionale e i suoi utenti, in quanto la disponibilità di innovativi rivestimenti autopulenti per superfici riflettenti determinerà un impatto considerevole in termini di riduzione dei costi delle operazioni di ordinaria manutenzione del campo solare (riduzione del consumo di acqua per singolo lavaggio e della frequenza dei cicli di pulizia) e, quindi, del costo dell'energia prodotta mediante tecnologia CSP. Inoltre, il risparmio di acqua (specie in aree a bassa piovosità del territorio nazionale oppure in aree desertiche di taluni territori UE e, soprattutto, extra UE) potrà avere una ricaduta considerevole in termini di salvaguardia ambientale.

### 3 Prodotti attesi

Nell'ambito della presente linea di attività LA1.8 il primo prodotto atteso è costituito da un report tecnico:

- "Materiali e componenti avanzati per impianti CSP - Realizzazione e caratterizzazione di un prototipo di specchio solare dotato di un innovativo rivestimento autopulente predisposto all'integrazione di idonea sensoristica" (Dicembre 2023).

Inoltre, nell'ambito della LA1.8 è attesa la fabbricazione e caratterizzazione di un prototipo di rivestimento autopulente per specchi solari, di dimensioni compatibili con l'impianto Fresnel "ENEA-SHIP" installato presso il C.R. ENEA di Casaccia. Siffatto prototipo si basa su formulazioni nano-composite ibride, che possono essere di natura inorganica, e quindi, ottenibili attraverso la tecnica dello *sputtering* reattivo e/o di natura polimerica e, quindi, ottenibili attraverso tecniche di processing dei polimeri, quali la stampa o lo spray. Si prevede inoltre la caratterizzazione in termini di prestazioni e la predisposizione all'integrazione di idonea sensoristica, che potrà essere rappresentata da formulazioni affini in termini di composizione ma contenenti differenti quantitativi di filler, oppure da elementi di geometria definita da sintetizzare nel corso della successiva linea di attività LA1.9.

**Caratteristiche dimensionali:** L'impianto sperimentale Fresnel "ENEA-SHIP" del C.R. ENEA di Casaccia è dotato di specchi commerciali di architettura Back Surface (BSM) di dimensioni 1250x625 mm. In caso di superficie riflettente autopulente realizzata con tecnica di deposizione *sputtering*, è atteso un prototipo costituito da moduli di dimensioni massime 500x400 mm cadauno, componibili e idonei a ricoprire l'intera superficie dello specchio commerciale. Siffatto requisito dimensionale è legato unicamente al vincolo dimensionale intrinseco alla macchina di *sputtering* in dotazione del laboratorio e non al processo di deposizione che sarà ottimizzato per essere robusto e fruibile da eventuali partner industriali. In caso di prototipo di superficie riflettente autopulente realizzata con tecnica di deposizione spray è attesa la copertura dell'intera superficie dello specchio commerciale.

**Caratteristiche prestazionali:** Le prestazioni target del prototipo sono definibili in termini di idrofobicità e trasparenza.

Idrofobicità: incremento dell'angolo di contatto statico (di seguito indicata come WCA, Water Contact Angle) da valori compresi tra 40° e 50° (tipici del vetro degli specchi) a valori di WCA > 90° del prototipo di superficie riflettente autopulente.

Trasparenza nel range spettrale solare:  $R_{SM}(\%) - R_{autopulente}(\%) < 8\%$  dove  $R_{SM}(\%)$  e  $R_{autopulente}(\%)$  sono rispettivamente le riflettanze speculari percentuali dello specchio solare tal quale e dello specchio rivestito dal materiale autopulente entrambe misurate ad una lunghezza d'onda di 660 nm.

## 4 Prodotti sviluppati

Nell'ambito della presente LA1.8, sono stati sviluppati, installati e caratterizzati nell'impianto sperimentale ENEASHIP due prototipi di specchi autopulenti di dimensioni reali.

Inoltre è stato emesso il presente report tecnico:

- A. Castaldo, E. Gambale, G. Vitiello, G. Cara, "Materiali e componenti avanzati per impianti CSP - Realizzazione e caratterizzazione di un prototipo di specchio solare dotato di un innovativo rivestimento autopulente predisposto all'integrazione di idonea sensoristica", Dicembre 2023, Report RdS\_PTR 22-24\_PR1.9\_LA1.8\_302.

## 5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Le attività della LA1.8 non hanno avuto scostamenti tecnici rispetto a quanto previsto dal capitolato vigente di Progetto e non vi sono state criticità nel loro espletamento.

In merito agli scostamenti economici, i costi totali (escluse spese generali) sostenuti e rendicontati per l'esecuzione della LA1.8, pari a circa 41,9 k€, sono minori rispetto a quelli a preventivo, pari a circa 46,4 k€. Le principali motivazioni degli scostamenti sono:

- I costi di personale (cat. A) a consuntivo, pari a 41,6 k€, sono minori del preventivo, pari a 42,9 k€, in quanto ENEA ha sostenuto ma non ha potuto esporre a consuntivo, causa superamento del contributo totale massimo ammesso dal capitolato vigente di Progetto, ulteriori circa 1,3 k€ di costi di personale.
- Non sono stati esposti costi per strumenti, attrezzature e software specifico (cat. B) perché, a causa di ritardi principalmente dovuti a problematiche amministrative nella procedura di affidamento dell'appalto, l'entrata in funzione di un analizzatore di parametri elettrici integrato (strumentazione per caratterizzazione elettrica) che era prevista a inizio Ottobre 2023, nell'ambito della LA1.8, è effettivamente avvenuta il 27/02/2024, nell'ambito della successiva LA1.9.
- I costi di esercizio (cat. C) a consuntivo, pari a circa 0,3 k€, sono di poco minori del preventivo, pari a 1 k€, per minori costi di viaggi e missioni.

## 6 Sintesi delle attività svolte

Le attività di ricerca e sviluppo della LA1.8 pertengono alla realizzazione di due prototipi di specchi solari autopulenti predisposti all'integrazione di idonea sensoristica installati presso l'impianto sperimentale "ENEA-SHIP" situato presso il Centro di ricerche ENEA di Casaccia. Al fine di verificarne le prestazioni sia in termini di durabilità che di autopulenza è stata svolta una campagna di misure sperimentali in campo.

Al contempo sono di acqua di lavaggio attesa con l'applicazione di rivestimenti autopulenti è stata predisposta state studiate formulazioni che conferiscono ai siffatti rivestimenti autopulenti proprietà sensoristiche, mirate all'autodiagnosi del livello di sporramento/*failure* degli specchi, nella prospettiva di dotare a costi contenuti (e contemplati nell'aggiunta di strati autopulenti) gli specchi di un campo solare di proprietà idonee al sensing distribuito, preliminare ad un'effettiva smartizzazione del campo stesso.

Inoltre, al fine di valutare la riduzione una metodologia per colmare un *issue* metrologico di settore, che ha consentito di stimare nel caso del prototipo testato una riduzione del consumo di acqua di lavaggio del 42%.

## 7 Dettaglio delle attività svolte

Gli specchi adoperati nei concentratori solari sono elementi altamente riflettenti con proprietà ottiche avanzate, grazie alle quali essi riescono a convogliare la luce del sole su opportuni elementi ricevitori, dove la radiazione concentrata viene convertita in calore sensibile di un fluido termovettore, allo scopo di produrre energia elettrica in impianti di grande taglia (come i *parabolic trough* o le torri solari), o calore in siti industriali[1].

Lo sporcamento, o il degrado della riflettività di questi specchi, ha un effetto diretto sulle prestazioni degli impianti CSP. Il peso e la natura dello sporco dipendono dalle condizioni micro e macro-climatiche dell'area geografica, dall'orografia del territorio (condizioni che a loro volta variano con le stagioni) e dall'orientamento stesso delle superfici riflettenti [2][3]. E' evidente come la mitigazione degli effetti dello sporcamento sia una questione cruciale per incrementare la competitività degli impianti a concentrazione solare.

Come diffusamente descritto in letteratura, esistono diversi approcci per limitare gli effetti dello sporcamento. Per le ragioni ampiamente analizzate nei report delle precedenti annualità, l'attività di ricerca si è focalizzata sulla fabbricazione di rivestimenti sottili da applicare sull'ultimo strato dello specchio solare che, salvaguardando i requisiti ottici, conferiscano al riflettore delle proprietà di autopulenza. Nella fattispecie, due tipologie di rivestimento sono state selezionate e destinate ad essere prodotte su una nuova scala dimensionale: un politipoide di nitrato di alluminio pensato per sostituire, anche in fase di produzione, lo strato di ossido di alluminio e un rivestimento di tipo ibrido (organico-inorganico), pensato come applicabile anche *ex post* ed eventualmente *in situ* sugli specchi di un campo solare.

### 7.1 Fabbricazione

I rivestimenti selezionati sono stati applicati su specchi di dimensioni reali attraverso tecniche ottimizzate nell'annualità precedente, perseguendo l'obiettivo complessivo dello *scaling-up* dalla fase laboratoriale ad una propriamente applicativa.

Il layer inorganico è fabbricato e applicato sulla superficie specchiante mediante una tecnica di sputtering reattivo. L'impianto per il processo, denominato ENEA2, in dotazione al laboratorio, non consente di alloggiare l'intero riflettore. Ci si è, pertanto, avvalsi di specchi processabili, di dimensioni 50x40x1 cm, perfettamente idonei ad essere incollati sullo specchio dell'impianto "ENEA-SHIP", consegnato nei nostri laboratori, modificato e rispedito nel centro di ricerche di Casaccia per poter essere installato.



Figura 1 - Incollaggio degli specchi in officina meccanica.

È opportuno sottolineare che, con un upgrade ad ENEA2 o altro impianto progettato all'uopo, il processo ottimizzato è perfettamente trasferibile a livello industriale. Siccome ENEA2 è utilizzato per processi di sputtering funzionali a diverse linee di attività, una sua modifica (per ottenere al massimo fino a 100cmx 40cm) avrebbe imposto dei fermi macchina molto lunghi ed economicamente onerosi, oltre al fatto di non poter comunque ricoprire l'intera superficie dello specchio reale.

Il layer nanocomposito ibrido, invece, è stato applicato direttamente sullo specchio dell'impianto mediante le consuete tecniche di processing dei materiali polimerici.

Al fine di dimostrare il soddisfacimento dei requisiti dimensionali (diffusamente descritti nel paragrafo 3) di entrambi i prototipi prodotti, nelle Figura 5 e Figura 6, sono mostrate le fotografie degli specchi realizzati e installati nell'impianto ENEA SHIP.

In Tabella 1, invece, sono riportate le misure di riflettanza assoluta, di riflettanza relativa ( $\Delta R (\%) = R_{\text{autopulente}}(\%) - R_{SM}(\%)$ ) misurate in campo mediante uno riflettometro speculare portatile in dotazione al laboratorio (modello 15R-USB della D&S) mentre le misure di bagnabilità sono state effettuate su campioni delle dimensioni di laboratorio fabbricato con le medesime condizioni di processo mediante un misuratore di tensione superficiale ed angolo di contatto ad angolo variabile (modello DSA 100 della KRUSS).

Le misure dimostrano l'ampio soddisfacimento dei requisiti prestazionali.

| Rivestimento       | R (%) a 660nm | $\Delta R (\%)$ a 660nm | WCA (°)  |
|--------------------|---------------|-------------------------|----------|
| Politipoide di AlN | 92.99±0.12    | 1.3±0.8                 | 93.7±1.4 |
| Polimerico         | 93.4±0.5      | 1.8±0.2                 | 93±3     |

Tabella 1 - Misura delle performance degli specchi installati in campo.

## 7.2 Installazione degli specchi rivestiti in campo

I rivestimenti selezionati sono stati applicati con tecniche differenti a seconda della natura del materiale su specchi solari di dimensione compatibile alla messa in esercizio nel campo solare denominato "ENEA-SHIP". Siffatto impianto (Figura 2) è stato realizzato all'interno del parco solare a concentrazione del Centro ricerche della Casaccia (Roma) con una tecnologia modulare e versatile, capace di garantire una fornitura di calore stabile ai processi industriali senza l'utilizzo di fonti fossili, con lo scopo di testare materiali e componenti innovativi in condizioni reali di funzionamento.



Figura 2 - L'infrastruttura sperimentale "ENEA-SHIP" è stata realizzata nell'ambito del Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 per la Ricerca di Sistema Elettrico nazionale.

Nel campo sperimentale sono stati esposti 4 specchi secondo lo schema della Figura 3 e la nomenclatura seguente:

- SB: Specchio riferimento Sud
- SA: Specchio con politipoide di AlN
- NB: Specchio riferimento Nord
- NA: Specchio con polimero.

In Figura 4 (sx) è mostrata la definizione delle porzioni di specchio sulle quali effettuare le misure periodiche di riflettanza. Questo passaggio è stato ritenuto opportuno al fine di monitorare lo sporcamento sull'intera area dello specchio e non solo su un punto. In Figura 5, la fotografia degli specchi installati nell'area sud e in Figura 6 quelli installati nell'area nord.

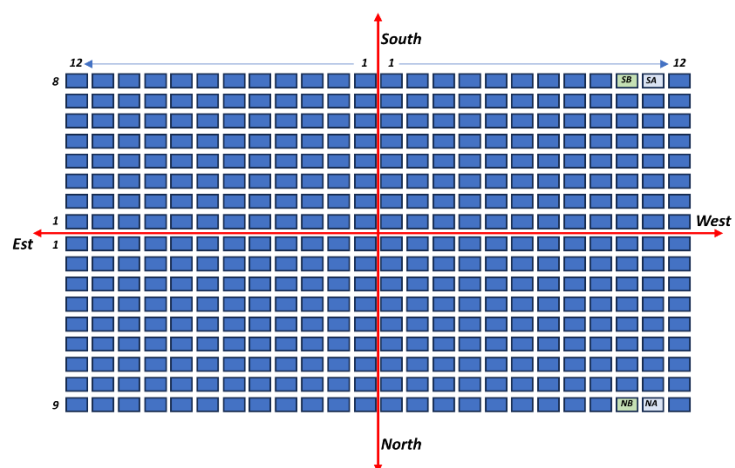


Figura 3 – Schema dell'impianto ENEA SHIP. Si evidenziano i punti i cui sono stati installati gli specchi trattati e gli specchi controllo.



Figura 4 – Specchio solare SA: Definizione dei punti di misura periodici.

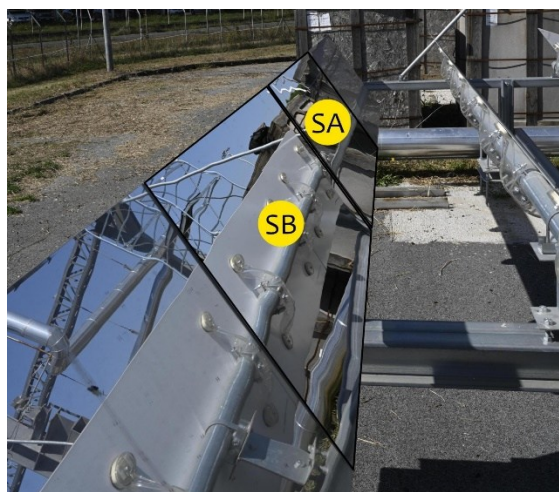


Figura 5 – Specchi installati in campo nell'area sud.



Figura 6 - Specchi installati in campo nell'area nord.

### 7.3 Campagna sperimentale di caratterizzazione delle prestazioni in campo

Le misure di riflettanza sono state effettuate con un riflettometro portatile D&S R15-USB che consente di effettuare misure ad un'unica lunghezza d'onda (660nm). La procedura di misura è descritta diffusamente nel report-rds\_ptr\_2021\_09 disponibile sul sito ENEA.

In primo luogo, sono confrontate le misure di riflettanza dei due specchi di riferimento NB e SB disposti rispettivamente nell'area nord e nell'area sud. In Figura 7 sono riportate le misure di riflettanza dei due specchi di riferimento dell'impianto non trattati e disposti a sud-ovest e a nord-ovest: le misure di riflettanza differiscono mediamente del 2,5% con picchi di 3,6%.

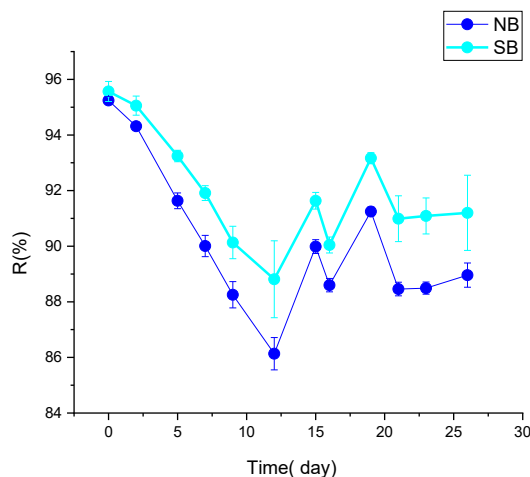


Figura 7 - Confronto tra i due specchi di riferimento collocati in aree diverse del campo solare.

In Figura 8, è riportato il confronto delle riflettanze dei due specchi dislocati a nord-ovest: in blu lo specchio di riferimento e in arancione quello rivestito col polimero. Al tempo  $t_0$ , lo specchio con trattamento aveva una  $R=93.4\pm0.5\%$ , mentre lo specchio di riferimento una riflettanza  $R=95.24\pm0.08\%$ . Con il procedere dello sporcamento, le perdite ottiche dello specchio trattato sono maggiori rispetto a quello tal quale a causa di un trattamento

diserbante su un campo prospiciente l'area dell'impianto. Questo imprevisto consente la considerazione di carattere generale che applicare rivestimenti polimerici in aree agricole richiede manutenzioni mirate. In Figura 9 è riportato il confronto tra specchio con rivestimento di politipoide di AIN (SA) e specchio non trattato (SB) disposti in area sud-ovest. Dai dati si evince che lo specchio rivestito incrementa la riflettanza dello specchio solare di partenza: ciò è imputabile all'ottimizzazione tra lo spessore del trattamento e il suo indice di rifrazione. Inoltre, le perdite per sporcamento sono inferiori rispetto a quelle dello specchio non trattato almeno fino al dodicesimo giorno di campionamento. In Tabella 2, i dati di una seconda campagna sperimentale.

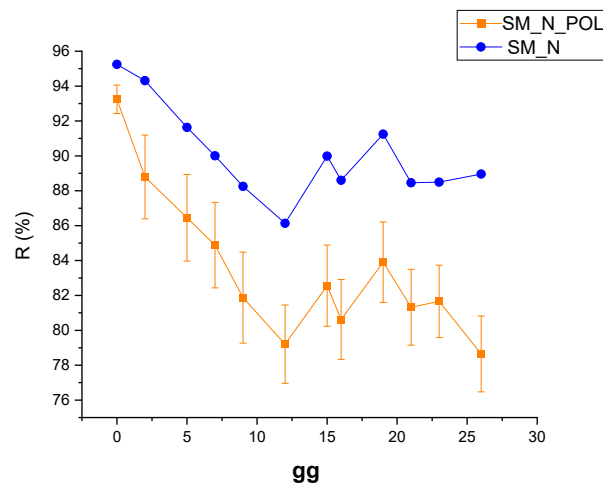


Figura 8 - Misure di riflettanza degli specchi disposti a N.O. In arancione lo specchio rivestito di polimero e in blu lo specchio di riferimento.

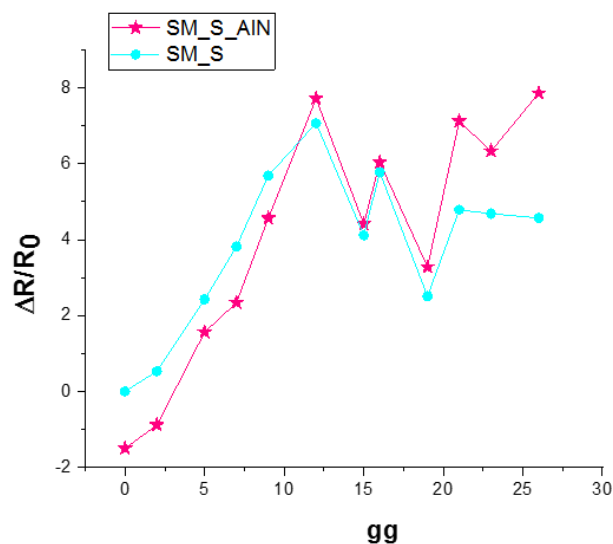


Figura 9 - Confronto tra le performance percentuali di riflettanza tra lo specchio con rivestimento di politipoide di AIN SA e specchio non trattato SB

| giorno | NA         | Specchio di riferimento |
|--------|------------|-------------------------|
| 0      | 93.38±0.19 | 92.2                    |
| 21     | 90.5±0.3   | 91.3                    |
| 24     | 89.7±0.2   | 90.01                   |

Tabella 2 - Seconda campagna di acquisizione di misure di R (%) di uno specchio rivestito con politipoide di AlN (NA) e lo specchio substrato.

L'aspetto saliente da sottolineare è che dopo procedura di pulizia per entrambi gli specchi sono stati registrati valori di riflettanza sovrapponibili a quelli iniziali: entrambi i rivestimenti non subiscono degrado durante l'esposizione alle intemperie.

#### 7.4 Individuazione di formulazioni nano-composite ibride con potenzialità autodiagnostiche interrogabili nei rivestimenti autopulenti.

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 [4]. Non esistono tuttora in uso impianti CSP gestiti attraverso tecnologie digitali e per raggiungere questo obiettivo occorrerebbe installare idonea sensoristica nei punti chiave che sono il campo solare, gli elementi ricevitori, i serbatoi di accumulo, la turbina etc., interfacciare questa sensoristica con tecnologie digitali e creare connessioni tra le varie tecnologie al fine di tradurre le informazioni e renderle al decisore-gestore dell'impianto.

Per quanto più propriamente attiene al campo solare, il primo step sarebbe la localizzazione di sensori *ex post* su tutti gli specchi, oppure la localizzazione di un unico sensore rappresentativo del funzionamento del campo. La localizzazione di sensori commerciali sugli specchi di un campo solare è una soluzione molto onerosa in termini di costi. Basti pensare che anche nel caso di un piccolo impianto dimostrativo, quale quello sperimentale "ENEA-SHIP" (potenza termica di picco dell'impianto di 190 kWt) occorrerebbero circa 20K€ per equipaggiare *ex post* ciascuno specchio con sensori piezoelettrici commerciali (per il monitoraggio puntuale dello sporcamento ma non della failure dello specchio), senza considerare i costi delle schede di acquisizione degli output dei sensori. A titolo esemplificativo, si consideri il calcolo del costo della sensorizzazione piezoelettrica discreta della superficie riflettente che contempla l'installazione di un sensore commerciale del tipo piezoelettrico su ogni specchio dell'impianto-

Il costo totale dei sensori è dato da:

$$Costo_{totale} = Numero_{specchi} \times costo_{sensore}$$

In Tabella 3 è riportato nel dettaglio i parametri utilizzati nella stima.

|                                                     |                                    |
|-----------------------------------------------------|------------------------------------|
| Potenza Termica Impianto                            | 190 kW <sub>t</sub>                |
| Numero specchi installato                           | 425                                |
| Dimensioni singolo specchio                         | 625×1250 mm (0.78 m <sup>2</sup> ) |
| Superficie Riflettente Totale                       | 332 m <sup>2</sup>                 |
| Costo Sensore Piezoelettrico (indagine commerciale) | 40 €                               |
| Costo Totale Sensori                                | 17.000 €                           |

Tabella 3 - Riepilogo dei parametri utilizzati nella stima dei costi di sensorizzazione dell'impianto "ENEA-SHIP" mediante sistemi piezoelettrici collocati ex-post.

Per quanto riguarda la localizzazione di un singolo sensore rappresentativo del funzionamento del campo solare un esempio è fornito dal prototipo di El Ydrissi [5]. Si tratta di una scatola fotografica posizionabile su uno specchio per volta e addestrata a determinare lo sporco per confronto attraverso il database di una rete CNN (convolutional neural network) che classifica le riflettanze speculari a differenti livelli di sporco e consente di riconoscere attraverso una serie di calcoli il livello di sporco del componente sul quale il sistema di monitoraggio fotografico viene posizionato. Siffatto prototipo è stato testato nell'impianto di Benguerir in Marocco.

Chiaramente siamo agli esordi di una tecnologia con una serie di limiti. Innanzitutto, occorre individuare quali parametri monitorare (sporco, failure da crash del componente, eccessiva umidità, formazione di brina, altro?), con quale cadenza (ogni specchio, ogni fila, uno per l'intero campo?), con quale affidabilità, con quali e quante interfacce da interrogare, con quali costi. Data la complessità della sensorizzazione ex post un vantaggio, secondo noi, proverrebbe dal sensing distribuito, ossia la capacità di rendere sensibili degli strati già previsti nei vari specchi, quali, ad esempio, quelli protettivi, resi autopulenti nel corso delle precedenti attività progettuali. A tal proposito, in considerazione della natura chimica di questi strati le formulazioni individuate a scopo sensoristico sono le seguenti:

- ✓ fasi piezoelettriche del nitruro di alluminio e suoi politipoidi fabbricabili per sputtering con opportune modifiche ai parametri di processo per sensori gravimetrici di polveri
- ✓ fasi conduttive di nanocompositi ibridi depositabili attraverso tecniche di processing dei polimeri per sensori multiparametrici.

Il razionale di queste scelte è poter produrre attraverso le stesse linee produttive (e sostenendo gli stessi costi) una "pelle" dello specchio solare in grado di assolvere sia a funzioni autopulenti che autodiagnostiche.

## 7.5 Messa a punto di un metodo per stimare il consumo di acqua di lavaggio di rivestimenti autopulenti per specchi solari

La comunità scientifica è concorde nel sostenere che una riduzione del volume di acqua impiegato per le operazioni di pulizia degli specchi solari richieda la modulazione della bagnabilità della superficie esposta spingendo verso superfici più idrofiliche o idrofobiche. La bagnabilità di un solido da parte di un liquido si valuta attraverso la misura dell'angolo di contatto. Per fornire un ordine di grandezza dei volumi di acqua, si tenga conto che per un impianto solare CSP con specchi parabolici da 50MW, i modelli economici stimano un consumo di acqua di lavaggio per gli specchi di  $50 \cdot 10^6$  L [6]. Questa stima è molto grossolana perché il consumo di acqua per le operazioni di lavaggio dipende da diversi fattori: la tipologia di sporco, il numero delle operazioni (periodiche o dettate dai valori minimi di riflettanza accettata) e la tipologia di procedura di pulizia. La letteratura scientifica di settore è ricca di casi studio che difficilmente possono essere confrontati tra loro: si passa da pulizie manuali a semi-automatiche con un utilizzo di 0.19 galloni di acqua per un metro quadrato di superficie specchiante [7], a semiautomatica ad ultrasuoni con un consumo di  $0.025 \text{ l/m}^2$  [8], ad una procedura con acqua pressurizzata ( $0.0383 \text{ l/m}^2$ ) [9], ad un'altra procedura semi-automatica che prevede una tipologia di pulizia diversa a seconda del grado di sporco ( $0.6 \text{ l/m}^2$  in caso di pulizia con acqua pressurizzata e  $0.45 \text{ l/m}^2$  in caso di pulizia con contatto e spazzolamento) [10]. In questa sezione intendiamo proporre un metodo sperimentale che consenta di valutare il consumo di acqua di lavaggio per una data unità di superficie e di legare la misura dell'angolo di contatto (WCA) di una data superficie all'acqua necessaria al suo lavaggio. Tale procedura, che si basa su una tecnica gravimetrica, consta di un primo step di misura del peso dei campioni e della bagnabilità (WCA) delle superfici da sottoporre a test. Un secondo step, invece, prevede l'alloggiamento dei campioni su un porta-campioni idonei a garantirne un'inclinazione controllata e la loro bagnatura per caduta con un peso noto di acqua. Dopo un tempo definito, il campione bagnato viene nuovamente pesato per la misura indiretta del peso dell'acqua trattenuta sulla superficie (per differenza). L'analisi dei dati consente di collegare il peso dell'acqua di lavaggio alla misura della bagnabilità di ciascuna superficie. L'apparato sperimentale consta di acqua deionizzata a  $10\text{M}\Omega$ , una bilancia tecnica XS BALANCE mod. BL 2002 adatto alloggiare lastre piane da  $10 \times 10 \text{ cm}$ . In Figura 10, è riportato lo schema a blocchi della procedura proposta.

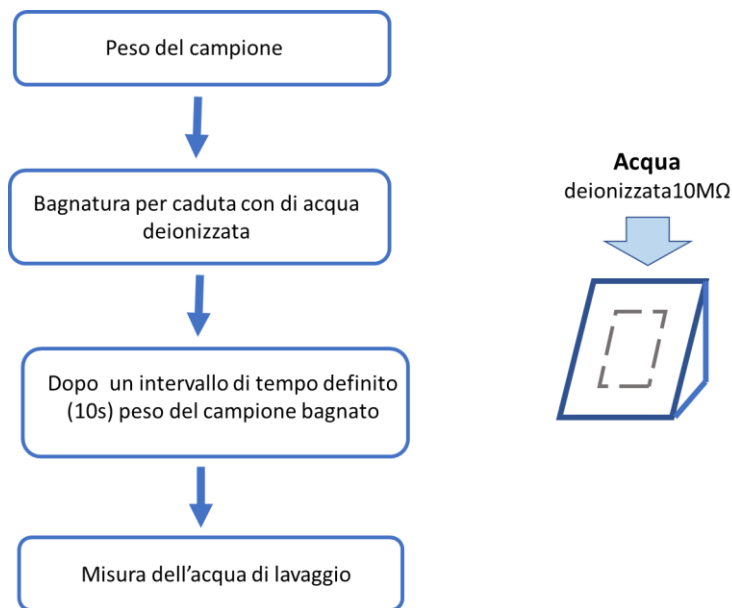


Figura 10 - Schema a blocchi della procedura di bagnatura.

Si fa presente che il volume di acqua di lavaggio misurato con tale procedura su campioni di dimensioni da laboratorio (10x10cm) è estendibile linearmente a superfici di dimensioni commerciali in quanto l'esperimento è assolutamente riproducibile e le uniche variabili sono le grandezze oggetto di misura.

In Tabella 4 sono riportate le misure dell'angolo di contatto  $\theta$  e la misura del peso dell'acqua di lavaggio per le superfici sottoposte a test.

| Sample         | WCA (°)    | Acqua di lavaggio (g)        |
|----------------|------------|------------------------------|
| Vetro Eagle XG | 46.8±1.5   | 0.12±0.20                    |
| AlN16_XG       | 89.6±1.9   | 0.07±0.01                    |
| Teflon         | 126.13±1.6 | <0.05 (sensibilità bilancia) |

Tabella 4 - Misure di WCA e acqua di lavaggio effettuate mediante la procedura su indicata su superfici inorganiche.

Le misure indicano che passando da una superficie di vetro (WCA~47°) a quella del politipide di nitrato di alluminio (WCA~90°), c'è una riduzione del 42% dell'acqua adoperata per il lavaggio.

## 8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non sono state utilizzate consulenze nell'ambito della LA1.8.

## 9 Pubblicazioni scientifiche

Sulla base dei risultati della LA1.8 sarà sottomesso un articolo (attualmente in fase di prima stesura) su rivista scientifica internazionale indicizzata. Della sottomissione e pubblicazione di detto articolo si renderà conto nell'ambito della successiva LA1.9.

## 10 Eventi di disseminazione

Dall'attività svolta nella LA1.8 è scaturita la partecipazione ai seguenti eventi:

1. Evento divulgativo aperto ai cittadini "Notte europea dei ricercatori 2023", Centro Ricerche ENEA di Portici, Portici (NA), Italia, 29 Settembre 2023 - "SVILUPPO DI SUPERFICI RIFLETTENTI PER GLI IMPIANTI SOLARI A CONCENTRAZIONE CON PROPRIETÀ DI AUTOPULENZA E AUTODIAGNOSI", a cura di: Anna Castaldo, Emilia Gambale, Giuseppe Vitiello.
2. Evento fieristico "European Maker Faire 2023", Roma, Italia, 20-22 Ottobre 2023 - "SPECCHIO SPECCHIO DELLE MIE BRAME...", a cura di: Anna Castaldo, Emilia Gambale, Giuseppe Vitiello.

- 
- [1] Ming Liu, N.H. Steven Tay, Stuart Bell, Martin Belusko, Rhys Jacob, Geoffrey Will, Wasim Saman, Frank Bruno, Review on concentrating solar power plants and new developments in high temperature thermal energy storage technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 53, 2016, Pages 1411-1432, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.026>.
- [2] Bergeron, K.D.; Freese, J.M. Cleaning Strategies for Parabolic Trough Solar Collector Fields; Guidelines for Decisions; Sandia National Lab. (SNL-NM): Albuquerque, NM, USA, 1981.
- [3] Wolfertstetter, F.; Wilbert, S.; Terhag, F.; Hanrieder, N.; Fernandez-García, A.; Sansom, C.; King, P.; Zarzalejo, L.; Ghennioui, A. Modelling the soiling rate: Dependencies on meteorological parameters. *AIP Conf. Proc.* 2019, 2126. [Google Scholar] [CrossRef] [Green Version]
- [4] Villasante-Corredoira, C., Mabe-Alvarez, J., Les Aguerrea, I., Peña-Lapuente, A., Sanchez-Gonzalez, M., Lopez, S. (2020). SMARTCSP: INDUSTRY 4.0 APPROACH FOR AN EFFECTIVE CONCENTRATED SOLAR POWER (CSP) COST REDUCTION. *DYNA*, 95(6). 629-634. DOI: <https://doi.org/10.6036/9766>
- [5] Assaad El Ydrissi, Hicham Ghennioui, El Ghali Bennouna, Azouzoute Alae, Mounir Abraim, Ibrahim Taabane, Abdi Farid, Dust InSMS: Intelligent soiling measurement system for dust detection on solar mirrors using computer vision methods, *Expert Systems with Applications*, Volume 211, 2023, 118646, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118646>.
- [6] Sandia National Laboratories, Report: SAND2007-3293, "Heliostat Cost Reduction Study", Gregory J. Kolb, Scott A. Jones, Matthew W. Donnelly, David Gorman, Robert Thomas, Roger Davenport, and Ron Lumia, June 2007
- [7] World Bank. Morocco—Integrated Solar Combined Cycle Power Project. Available online: <http://documents.worldbank.org/curated/en/2013/06/17991428/morocco-integrated-solar-combined-cycle-power-project> (accessed on 8 October 2018).
- [8] Bru, P.; Bulliard, S.O.; Couturier, R. Système et Procédé de Nettoyage par Ultrasons d'une Surface Encrassée Comportant un Dispositif Générateur d'ondes Ultrasonores. FR3026323B1, 26 September 2014.
- [9] Zhang Dong, Liu Chang, Yu Kai, Yan Chengtao, Shen Yongqian, An Zhoujian, Jing Jinlong, Droplet cleaning method and water consumption analysis for superhydrophobic solar photovoltaic glass, *Solar Energy*, Volume 235, 2022, Pages 94-104, ISSN 0038-092X, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.02.030>.
- [10] Optimized mirror cleaning strategies in PTC plants reducing the water consumption and the levelized cost of cleaning Shahab Rohani; Nada Abdelnabi; Thomas Fluri; Anna Heimsath; Christof Wittwer; Javier García Pérez Ainsua *AIP Conf. Proc.* 2126, 220004 (2019) <https://doi.org/10.1063/1.5117763>