

PIANO TRIENNALE DI REALIZZAZIONE 2022-2024 - RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO NAZIONALE

Progetti di ricerca di cui all'art. 10 comma 2, lettera a) del decreto 26 gennaio 2000

AFFIDATARIO: Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile [ENEA]

Tema - Titolo del progetto: 1.9 "Solare termodinamico"

Durata: 36 mesi

Semestre n. 6 – Periodo attività: 01/07/2024 – 31/12/2024

ABSTRACT ATTIVITA' SEMESTRALE:

Il Progetto 1.9 "Solare termodinamico", che prevede 1 work package (WP1), è organizzato in 3 tematiche scientifico-applicative, ognuna delle quali comprende diverse linee di ricerca che si sviluppano in linee di attività (LA) in carico all'affidatario ENEA o alle Università co-beneficiarie; per la comunicazione e disseminazione dei risultati sono previste 2 ulteriori LA.

Nel 2° semestre 2024 (ultimo semestre del triennio di Progetto) sono proseguite e sono state portate a termine 15 LA (LA1.2, LA1.3, LA1.5, LA1.6, LA1.9, LA1.10, LA1.13, LA1.14, LA1.17, LA1.18, LA1.19, LA1.20, LA1.23, LA1.24, LA1.26), in carico sia a ENEA che alle 6 Università co-beneficiarie, che hanno interessato tutte le 3 tematiche scientifico-applicative, nonché l'attività di comunicazione e disseminazione.

In particolare, con riferimento alla tematica "materiali e componenti avanzati per impianti CSP", le attività svolte hanno riguardato le linee di ricerca (i) sui coating innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti CSP a collettori lineari (LA1.2, in carico a ENEA, e LA1.3, in carico all'Università di Palermo), (ii) sulla tecnologia micro-CSP basata su sistemi di tipo micro-PTC per la generazione distribuita di energia in contesti civili e industriali (LA1.5, in carico a ENEA, e LA1.6, in carico all'Università degli Studi di Firenze), (iii) sulle superfici riflettenti autopulenti con sensoristica integrata per impianti CSP (LA1.9, in carico a ENEA) e (iv) sui sistemi di accumulo termo-chimico a zeoliti per applicazioni distribuite a media temperatura del CSP (LA1.10, in carico a ENEA).

Inoltre, con riferimento alla tematica "ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili", le attività svolte hanno riguardato le linee di ricerca (i) sui sistemi di accumulo termico, di tipo termoclino, ibridizzati alimentabili da CSP e da altre tecnologie energetiche rinnovabili, per la produzione di calore per processi industriali (LA1.13, in carico a ENEA, e LA1.14, in carico al Politecnico di Torino), (ii) sui sistemi innovativi di riscaldamento elettrico dei sali fusi per l'ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili (LA1.17, in carico a ENEA, e LA1.18, in carico al Politecnico di Torino) e (iii) sulla simulazione e ottimizzazione di impianti ibridi CSP/PV/Eolici di scala medio-piccola operanti sui mercati MGP e MSD (LA1.19, in carico al Politecnico di Milano).

In aggiunta, con riferimento alla tematica "soluzioni tecniche e procedure operative per il settore industriale del CSP", le attività svolte hanno riguardato le linee di ricerca (i) sulle tecnologie ad ultrasuoni per sistemi di rilevazione di occlusioni solide all'interno del piping di impianti CSP utilizzando miscele di sali fusi come fluido

termovettore (LA1.20, in carico all’Università degli Studi di Napoli Federico II) e (ii) sulle procedure operative per impianti CSP con fluido termovettore costituito da miscele di sali fusi bassofondenti e studio della compatibilità dei materiali a contatto con le miscele in condizioni reali di funzionamento (LA1.23, in carico a ENEA, e LA1.24, in carico all’Università degli Studi di Roma Tor Vergata).

Infine, anche l’attività di comunicazione e disseminazione è stata regolarmente svolta (LA1.26, in carico a ENEA).

In generale, tutte le LA in esecuzione sono state concluse nel corso del 2° semestre 2024 e, per tali LA, sono state svolte tutte le attività previste e ottenuti tutti i risultati attesi; le criticità (laddove riscontrate) sono state superate e non si sono verificati scostamenti tecnici rispetto a quanto previsto dal capitolato vigente di Progetto (a eccezione di un prodotto sviluppato nella LA1.23 risultato non conforme alle attese). In merito ai forti ritardi nell’ultimazione della LA1.11 (7 mesi) e ai limitati ritardi nell’ultimazione della LA1.4 (3 mesi): (i) con riferimento alle specifiche linee di ricerca cui queste LA afferiscono (rispettivamente, “sistemi di accumulo termico, di tipo termoclino, ibridizzati, ...” e “tecnologia micro-CSP basata su sistemi di tipo micro-PTC, ...”), non si sono verificate ripercussioni né in termini di ottenimento dei risultati attesi, né di sviluppo dei prodotti previsti; (ii) con riferimento al Progetto nel suo complesso, non hanno comportato scostamenti tecnico-economici di rilievo e non ne ha influenzato l’ottenimento degli obiettivi generali.

ATTIVITA' SVOLTE	
AFFIDATARIO / COBENEFICIARIO	SINTESI DELLE ATTIVITÀ DI RICERCA SVOLTE, RISULTATI CONSEGUITI E RICADUTE SUL SETTORE PRODUTTIVO
ENEA	Facendo riferimento alla struttura del Progetto 1.9 “Solare termodinamico”, sono di seguito descritte le attività svolte nel 2° semestre 2024 da ENEA. Tematica scientifico-applicativa “materiali e componenti avanzati per impianti CSP”. - Nell’ambito della linea di ricerca sui “coating innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti CSP a collettori lineari”, nel 2° semestre 2024 è proseguita ed è stata portata a termine la LA1.2 avente per oggetto la “realizzazione di coating innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti micro-PTC a media temperatura e di coating innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti CSP ad alta temperatura”. In particolare, nel corso del 2° semestre 2024, è stato raggiunto il secondo dei due principali obiettivi della LA1.2 che consisteva nel realizzare un coating innovativo con riflettore IR d’Ag per tubi ricevitori evacuati di impianti CSP (a collettori lineari parabolici, PTC, o Fresnel, LFC, di grande taglia) operanti a 550 °C. Il riflettore IR d’Ag è stato stabilizzato fino a 550 °C depositandolo sopra uno strato metallico di W e ricoprendolo con uno strato di Al₂O₃, depositato a basso flusso di O₂, o di AlN, depositato con alto o basso flusso di N₂. Il degrado dell’efficienza di conversione fototermica ($\Delta\eta_{pt}$) dei coating dopo 25 anni (8h/giorno) a 550 °C è stato stimato con maggiore accuratezza aggiungendo un ulteriore test di ageing accelerato a 650 °C rispetto a quelli condotti a 620 e 690 °C nell’ambito della precedente LA1.1. Sono stati messi a punto processi di sputtering d’interesse industriale (semplici, robusti, a basso costo e con alta velocità di deposizione) per la fabbricazione dell’intero coating solare su substrato tubolare. Dei tre coating, che i suddetti ageing test accelerati avevano dimostrato essere termicamente stabili, il coating con AlN depositato a basso flusso di N₂ è stato realizzato con le prestazioni fototermiche ottimizzate. Il coating in questione presentava α_s pari a 95.1% e ϵ_h a 550 °C uguale a 9.5%, costituendo il nuovo “stato dell’arte” dei coating per tubi ricevitori solari d’impianti CSP operanti ad alta temperatura. È stato

quindi realizzato un prototipo di coating per il tubo ricevitore evacuato di impianti CSP per applicazioni a temperatura di 550 °C. Il prototipo di coating, che costituiva uno dei prodotti attesi della LA1.2, è stato depositato su un tubo d'acciaio di diametro esterno 70 mm, spessore di parete 2 mm e lunghezza di 600 mm. Sempre con riferimento alla LA1.2, nel corso nel 2° semestre 2024 è stata portata a termine l'attività di realizzazione di film di silice (SiO₂) prodotti per sol-gel e depositati per spin coating mediante la strumentazione acquisita nella LA1.1; nella fattispecie, mediante il processo sol-gel sono state realizzate tre soluzioni a differente pH a base di SiO₂; le stesse sono state successivamente depositate su substrati di vetro Corning XG mediante il nuovo spin coater, ottenendo film di SiO₂ con tre differenti gradi di porosità, di cui quello caratterizzato dalla porosità più bassa, ovvero superficie più densa e uniforme, presentava caratteristiche tali da poter essere impiegato come strato antiriflesso dei coating solari sviluppati nell'ambito del Progetto.

In merito alle ricadute applicative sul sistema energetico e produttivo nazionale dei risultati del complesso della linea di ricerca "coating innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti CSP a collettori lineari" è possibile evidenziare che:

- i. La tecnologia ENEA di deposizione del CERMET a doppio nitrato consente di realizzare i coating dei tubi ricevitori solari evacuati di impianti micro-CSP di tipo micro-PTC con prestazioni fototermiche eccellenti e praticamente invariabili per una vita utile di almeno 25 anni alla temperatura di 350 °C; tutto questo si traduce nella possibilità di generare, con elevata efficienza, energia distribuita in contesti civili e industriali.
- ii. L'impiego di tubi ricevitori dotati del nuovo coating "stato dell'arte" per applicazioni ad alta temperatura garantisce un incremento della produzione di energia stimabile, mediante i principali modelli di simulazione di funzionamento degli impianti CSP, tra il 5 e il 10 % per punto percentuale di riduzione di ϵ_h a 550 °C, a seconda della localizzazione dell'impianto CSP nella fascia geografica del Mediterraneo.
- iii. I risultati ottenuti sono prossimi all'applicazione (TRL intorno a 7) e, pertanto, possono essere oggetto, su un orizzonte temporale di breve-medio periodo, di ingegnerizzazione in collaborazione con partner industriali e di trasferimento tecnologico ad aziende manifatturiere nazionali di componentistica avanzata per impianti CSP e, più in generale, per impianti solari.

- Nell'ambito della linea di ricerca sulla "tecnologia micro-CSP basata su sistemi di tipo micro-PTC per la generazione distribuita di energia in contesti civili e industriali", nel 2° semestre 2024 è proseguita ed è stata portata a termine la LA1.5 avente per oggetto la "caratterizzazione sperimentale di un prototipo di sistema micro-PTC innovativo sviluppato da UniFI".

Nella LA1.5, nel corso del 2° semestre 2024, ENEA, con il supporto dell'Università degli Studi di Firenze (UniFI), ha effettuato la caratterizzazione sperimentale, termica e ottica, del prototipo di sistema micro-PTC proposto da UniFI che nel precedente semestre di Progetto, e in particolare nel mese di giugno 2024, era stato consegnato presso il C.R. ENEA di Casaccia e collegato alla "stazione testing componenti solari a media e bassa temperatura" (opportunamente predisposta) dell'impianto sperimentale "ENEA-SHIP". La prima parte delle attività ha riguardato la caratterizzazione termica del sistema micro-PTC, il cui obiettivo principale era di valutarne l'efficienza termica (η) a vari livelli di temperatura. I test sono stati effettuati con inseguimento solare a doppio asse (1 asse di tracking della piattaforma rotante su cui è stato alloggiato il micro-PTC + 1 asse di tracking dei collettori del micro-PTC), per azzerare le perdite da angolo di incidenza, e con sistema ibrido (algoritmo + sensore a fotodiodi). Non risultava possibile effettuare prove di lunga durata con temperatura maggiore di 265 °C per limiti della stazione di testing (T massima del buffer di accumulo della caldaia e lunghezza del circuito a olio diatermico); pertanto, è stato indagato il campo di temperature tra 120 °C e 265 °C. Tuttavia, è stato possibile raggiungere, sebbene per tempi limitati, una temperatura in uscita dal sistema micro-PTC pari a 305 °C; a tale temperatura il micro-PTC non ha evidenziato alcun problema. I test sono stati eseguiti secondo la norma ISO 9806:2017 "Solar energy - Solar thermal collectors - Test methods" in modalità "steady state", ovvero con variabili di interesse (T in ingresso e in uscita dal micro-PTC, DNI, portata) stabili durante la misura per almeno 10'. I risultati dei test di caratterizzazione termica del micro-PTC hanno mostrato che il sistema raggiunge un'efficienza termica di circa il 40% a 265 °C, con una riduzione dell'efficienza nel range di temperatura analizzato (125 – 264 °C).

limitata e pari a circa il 13%. La limitata efficienza del micro-PTC rispetto ai PTC di grande taglia chiaramente rappresenta una criticità, la cui causa principale è attribuibile all'elevata emissività termica (ϵ_h) del coating dei tubi ricevitori attualmente in dotazione al micro-PTC ($\epsilon_h > 10\%$ a $T \geq 200\text{ }^\circ\text{C}$); per migliorare le prestazioni del micro-PTC si rende pertanto necessario implementare coating con $\epsilon_h < 10\%$ a $300\text{ }^\circ\text{C}$. Una fonte di incertezza nel calcolo dell'efficienza è stata comunque identificata nella variabilità intrinseca della DNI, che rappresenta la principale componente dell'errore statistico nelle misure. A causa dell'elevata viscosità alle basse temperature dell'olio diatermico, non risultava possibile valutare l'efficienza ottica di picco (η_o) del micro-PTC collegato al circuito standard di "ENEA-SHIP" che impiega olio diatermico come fluido termovettore. Per ovviare a questa limitazione, è stato allestito un secondo set-up sperimentale utilizzando acqua come fluido termovettore. In queste condizioni, è stata misurata un'efficienza ottica di picco compresa tra il 72% e il 75%. Nel complesso, i test di caratterizzazione termica effettuati hanno dimostrato che il sistema micro-PTC sviluppato da UniFI è in grado di produrre calore fino a $300\text{ }^\circ\text{C}$ e, potenzialmente, anche fino a $350\text{ }^\circ\text{C}$. La seconda parte delle attività ha riguardato la caratterizzazione ottica dei concentratori del sistema micro-PTC. Sono state eseguite due differenti procedure sperimentali volte a determinare l'intercept factor, cioè la frazione di radiazione solare riflessa che effettivamente raggiunge il tubo ricevitore: (1) procedura "da vicino", in cui è stato utilizzato un carrello strumentato "VISfield" che ha permesso l'analisi dettagliata dell'allineamento tra il tubo ricevitore e lo spot solare riflesso dal concentratore; (2) procedura "da lontano", in cui le misure sono state effettuate da una distanza di alcune centinaia di metri (in modo da simulare la condizione di raggi solari paralleli) più rappresentativa dell'irraggiamento solare reale. Le scansioni sono state effettuate su una porzione centrale larga 55 cm di due dei quattro collettori del micro-PTC. I risultati dei test di caratterizzazione ottica del micro-PTC hanno mostrato un intercept factor medio pari al 66% e 77% rispettivamente per i due collettori scansionati, valori significativamente inferiori rispetto a quelli teorici attesi, che superano l'84%. La principale criticità emersa riguarda proprio questi bassi valori di intercept factor, le cui cause sono state individuate nelle irregolarità (i) del profilo parabolico dei concentratori allontanandosi dalle centine e (ii) della posa (manuale) della pellicola riflettente, dovute al processo costruttivo "artigianale" del sistema micro-PTC e, in particolare, dei concentratori. Per superare queste limitazioni, risulta essenziale procedere a un'ottimizzazione dei processi costruttivi del sistema micro-PTC e, in particolare, nella realizzazione e assemblaggio dei suoi concentratori.

- Nell'ambito della linea di ricerca sulle "superfici riflettenti autopulenti con sensoristica integrata per impianti CSP", nel 2° semestre 2024 è proseguita ed è stata portata a termine la LA1.9 avente per oggetto la "fabbricazione, attraverso tecniche economiche e scalabili, di sensori piezoelettrici e/o resistivi e loro integrazione negli specchi autopulenti".

Nella LA1.9, nel corso del 2° semestre 2024, è proseguito lo sviluppo di sensori costituiti da nanocompositi polimerici resistivi a base di polisilsesquiossani realizzati con tecniche di processing dei polimeri (spray o stampa) e, in particolare, sono stati realizzati vari prototipi di sensori resistivi su scala laboratoriale (dimensioni minori di $5 \times 5\text{ cm}$), a base di nanocompositi polimerici, con resistività $\rho < 10^5\text{ }\Omega\text{cm}$, integrabili in specchi solari autopulenti. Inoltre, è stato esplorato il drogaggio dei nitruri di alluminio (ben noti per le loro proprietà isolanti) con particelle metalliche per sviluppare compositi in grado di alterare la loro resistività elettrica in risposta a vari input correlati ai guasti. Seguendo questo approccio, è stata testata anche una famiglia di compositi inorganici contenenti quantità variabili di ossido di zinco (ZnO). Questi compositi presentano sia proprietà piezoelettriche, dovute all'effetto combinato dell'anisotropia complessiva del film sottile e del comportamento piezoelettrico intrinseco dello ZnO, sia proprietà resistive, derivanti dalla presenza di isole conduttive cristalline di ZnO incorporate all'interno di una matrice isolante. In conclusione, la LA1.9 ha dimostrato la possibilità di depositare attraverso tecniche scalabili a livello industriale (quali lo sputtering, e/o lo spray, e/o la stampa) film sottili autopulenti e piezoelettrici e/o resistivi con potenziali proprietà sensoristiche; in particolare, sono stati fabbricati un prototipo di sensore piezoelettrico e diversi sensori resistivi su scala laboratoriale, integrabili in rivestimenti autopulenti per specchi solari. Tutti i rivestimenti sviluppati nella LA1.9 (sia nel presente semestre che in quello precedente) oltre a esibire proprietà sensoristiche, risultavano trasparenti nello spettro solare e mantenevano prestazioni autopulenti. Un simile

risultato, combinando l'autopulenza e le proprietà elettriche con la trasmittanza ottica elevata, getta le basi per la fabbricazione di architetture neurali idonee al sensing distribuito e ciò, in una prospettiva di applicazione di medio-lungo termine, potrebbe ridurre significativamente i costi di manutenzione del campo di specchi solari.

Più in generale, i risultati ottenuti nel complesso della linea di ricerca "superfici riflettenti autopulenti con sensoristica integrata per impianti CSP" sono in grado di configurare benefici ambientali, nonché per il sistema elettrico nazionale (e i suoi utenti) e per il sistema produttivo, in quanto:

- i. La disponibilità di innovativi rivestimenti autopulenti per superfici riflettenti può determinare 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.
 - ii. 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) può avere una ricaduta considerevole in termini di salvaguardia ambientale.
 - iii. La disponibilità di innovativi rivestimenti sensori per superfici riflettenti può determinare, in una prospettiva di medio-lungo termine, 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, consentendo di gestire "on demand" le operazioni di pulizia.
- Nell'ambito della linea di ricerca sui "sistemi di accumulo termo-chimico a zeoliti per applicazioni distribuite a media temperatura del CSP", nel 2° semestre 2024 è proseguita ed è stata portata a termine la LA1.10 avente per oggetto l'"analisi, implementazione delle facility di test e sperimentazione in campo di sistemi di accumulo termo-chimico a zeoliti per applicazioni distribuite a media temperatura".

Nella LA1.10, nel corso del 2° semestre 2024, è stata portata a termine l'implementazione delle facility di test dei sistemi di accumulo a zeoliti del C.R. ENEA di Trisaia, costituite principalmente dall'impianto "Sunstore" e dall'impianto di test ad olio diatermico, per ottenere un nuovo assetto operativo con range di temperatura tra 150 e 250 °C. In particolare, è stato effettuato il collaudo funzionale dei vari sub-componenti oggetto dell'appalto per la «fornitura e installazione di apparecchiature e strumenti per l'up-grade impianto "Sunstore"» e dell'intera facility nel suo nuovo assetto operativo. Sono state condotte attività di sperimentazione in campo sulle facility di test che hanno consentito di caratterizzare le prestazioni energetiche del sistema di accumulo termo-chimico a zeoliti sintetiche 13X in un range di temperatura tra 150 e 250 °C. Dalla sperimentazione è emerso che: (1) A 24 ore dall'inizio della "fase di carica", la densità di accumulo di energia è compresa tra 100 e 165 kWh/m³ in funzione della temperatura di ingresso del fluido termovettore (HTF) compresa tra 150 e 250 °C; dopo 24 h il sistema raggiunge mediamente l'85% della carica massima ottenibile. (2) A 24 ore dall'inizio della "fase di scarica", il sistema di accumulo rilascia tra 70 e 40 kWh di energia a utenze connesse che richiedono, rispettivamente, calore compreso tra 100 e 150 °C; dopo 24 ore le percentuali di scarica si attestano intorno all'80% dell'energia massima scaricabile. I risultati sperimentali ottenuti hanno evidenziato un sostanziale accordo con quelli delle simulazioni numeriche condotte mediante il modello dinamico a parametri concentrati del reattore a zeoliti sviluppato ad hoc, in ambiente Matlab, nei semestri precedenti. Infine, è stata condotta un'analisi del potenziale applicativo dei sistemi di accumulo termo-chimico a zeoliti considerando (i) sorgenti termiche costituite da impianti solari a concentrazione operanti a temperature tra 150 e 250 °C e (ii) utenze rappresentate da processi industriali con richiesta di calore a temperature tra 100 e 150 °C. Dalle analisi effettuate sono emersi i seguenti indicatori prestazionali: (1) le aliquote medie di ripartizione del calore accumulato tra termo-chimico e sensibile si attestano, rispettivamente, all'85% e al 15%; (2) le percentuali di carica, a diversi tempi di funzionamento del processo, si attestano ai valori medi del 45% dopo 8 ore, 70% dopo 16 ore e 85% dopo 24 ore; (3) i valori massimi di densità di accumulo si attestano a circa 130 kWh/m³ per temperatura di carica di 150 °C e 185 kWh/m³ per temperatura di carica di 250 °C.

	Tematica scientifico-applicativa “ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili”. - Nell’ambito della linea di ricerca sui “sistemi di accumulo termico, di tipo termoclino, ibridizzati alimentabili da CSP e da altre tecnologie energetiche rinnovabili, per la produzione di calore per processi industriali”, nel 2° semestre 2024 è proseguita ed è stata portata a termine la LA1.13 avente per oggetto la “realizzazione e sperimentazione di un prototipo di sistema di accumulo termoclino ibridizzato alimentabile da CSP e altre tecnologie FER, asservito all’impianto ENEA-SHIP, per la produzione di calore per processi industriali”. Nella LA1.13, nel corso del 2° semestre 2024, la società appaltatrice del Contratto avente per oggetto “lavori per la realizzazione della sezione di prova PTR Ibrido” ha completato la realizzazione e l’assemblaggio del prototipo di sistema di accumulo termoclino a sali fusi ibridizzato tra CSP e altre tecnologie FER (che era stato progettato nella LA1.11). La società ha successivamente trasportato il prototipo presso il C.R. ENEA di Casaccia e ha effettuato i collegamenti con il campo solare Fresnel dell’impianto “ENEA-SHIP” e con la caldaia elettrica alimentabile da PV, realizzando il piping e installando tutti gli ausiliari/strumentazione necessari per il "balance of plant" (BOP), come previsto dal progetto preliminare del sistema; lo scambiatore di scarica del sistema di accumulo veniva collegato con un aerotermo atto a simulare l’utenza termica finale. È stato quindi eseguito il collaudo del prototipo, di tutti i componenti e gli ausiliari/strumentazione installati ed è stato portato a termine il commissioning dell’intero dimostratore tecnologico di impianto CSP ibridizzato con altra tecnologia FER “elettrica” (in primis PV) per la produzione di calore (solare) per processi industriali, costituito dal preesistente impianto sperimentale Fresnel “ENEA-SHIP” con asservito il nuovo prototipo di sistema di accumulo termoclino a sali fusi ibridizzato. Sono state condotte prove funzionali al fine di caratterizzare il prototipo e i componenti principali del circuito ed è stata condotta una campagna sperimentale volta a studiare il comportamento dell’intero sistema in condizioni di carica e scarica di energia termica. Allo scopo sono state definite le condizioni di prova e sono state acquisite e poi analizzate le principali grandezze del sistema, quali le temperature in ingresso e uscita dagli scambiatori di calore, sia del fluido termovettore (olio diatermico Therminol-66) che del mezzo di accumulo (miscela di sali fusi ternari Hitec-XL), la portata dei due fluidi, le temperature interne al serbatoio (al fine di verificare la stratificazione termica e, quindi, la formazione del “termoclino”), le potenze termiche scambiate, l’energia fornita e accumulata. Sulla base dei dati acquisiti è stato valutato il comportamento e l’efficienza degli scambiatori di calore. Sono state definite e testate le procedure operative di gestione di un impianto CSP ibridizzato (con PV), ottimizzate per massimizzare la generazione e l’accumulo di energia termica da fonte solare, per l’alimentazione di processi industriali che necessitano di calore e/o energia elettrica. In prima battuta sono state studiate le procedure di avvio e spegnimento dei due distinti circuiti del CSP e del PV che alimentano il sistema di accumulo termico (TES) ibridizzato. Successivamente sono state testate le procedure di funzionamento combinato delle due tecnologie rinnovabili che alimentano il TES. In merito alle condizioni operative è emerso quanto segue: (i) il PV, lavorando sia con la radiazione solare diretta che con la diffusa, ha un range temporale operativo maggiore del CSP, che lavora con la sola diretta; (ii) il PV inizia ad alimentare il TES prima del CSP; (iii) il CSP alimenta il TES per DNI superiore a un valore di soglia $DNI_{min} \approx 250-300 \text{ W/m}^2$; (iv) per $DNI > DNI_{min}$, è possibile alimentare il TES contemporaneamente da CSP e PV; (v) a TES carico, il PV può immettere elettricità in rete o alimentare utenze locali mentre il CSP va defocalizzato; (vi) in caso di CSP defocalizzato o per $DNI < DNI_{min}$, è possibile avviare la fase di scarica del TES. Dalla sperimentazione è emerso il seguente principale limite operativo del sistema: la configurazione del prototipo di TES ibridizzato con scambiatori di carica da CSP e di scarica sullo stesso asse non rende possibile effettuare contemporaneamente la carica del TES da CSP e la scarica del TES. - Nell’ambito della linea di ricerca sui “sistemi innovativi di riscaldamento elettrico dei sali fusi per l’ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili”, nel 2° semestre 2024 è proseguita ed è stata portata a termine la LA1.17 avente per oggetto la “realizzazione e sperimentazione di un dispositivo su scala di laboratorio per il riscaldamento elettrico dei sali fusi”.
--	---

Nella LA1.17, nel corso del 2° semestre 2024, è stata svolta una campagna sperimentale sul dispositivo sperimentale su scala di laboratorio, realizzato nel precedente semestre, al fine di identificare le caratteristiche di funzionamento del riscaldamento elettrico dei sali fusi con le micro-onde, individuandone preliminarmente le prestazioni e gli eventuali limiti. La campagna sperimentale sul dispositivo ha previsto tre sottofasi di seguito descritte. (1) Caratterizzazione termica del serbatoio: le dissipazioni termiche dal serbatoio cilindrico, al variare della temperatura media del sale, sono state identificate con l'ausilio di resistenze elettriche integrate nel serbatoio stesso. In condizioni stazionarie, la potenza elettrica fornita dalle resistenze elettriche per mantenere i sali in temperatura corrisponde alla potenza termica dissipata verso l'ambiente esterno. Tali prove hanno consentito di misurare la potenza dispersa dal serbatoio al variare della temperatura e di chiudere in modo rigoroso i bilanci di energia nelle successive prove di riscaldamento con le micro-onde. (2) Caratterizzazione elettromagnetica del serbatoio: tali prove sono state finalizzate alla valutazione del coefficiente di riflessione elettromagnetico della cavità risonante, rappresentata dal serbatoio cilindrico, nell'intervallo di frequenze di interesse ($2450 \text{ MHz} \pm 25 \text{ MHz}$) al variare della temperatura dei sali. Dalle misure è emerso che, nello spettro di frequenze analizzato, la potenza riflessa varia significativamente, da un valore minimo inferiore al 5% a un valore massimo superiore al 35%. Il minimo di potenza riflessa varia con la temperatura e si raggiunge sempre nell'intervallo di frequenze compreso tra 2430 e 2445 MHz. Inoltre, dalle prove è emerso che, per operare efficacemente un sistema di riscaldamento dei sali mediante microonde, si rende necessario adottare un generatore preciso ($\pm 5 \text{ MHz}$) e regolabile in frequenza. (3) Prove di riscaldamento elettrico dei sali mediante microonde: per verificare sperimentalmente il riscaldamento dei sali binari con le micro-onde, i sali sono stati inizialmente fusi utilizzando le resistenze elettriche, raggiungendo un plateau termico a una temperatura di circa 300°C . Successivamente è stato azionato il generatore di microonde aumentando gradualmente la potenza erogata fino al valore nominale previsto dal test. Ove possibile, si è mantenuto il valore nominale della potenza fino al raggiungimento di un nuovo plateau. I risultati ottenuti hanno confermato la fattibilità tecnica della soluzione proposta. In particolare, è stata riscontrata una potenza elettrica dissipata nei sali di circa 100 W/kg (valore che può essere incrementato in condizioni operative ottimali) e una velocità di riscaldamento superiore del 37% rispetto all'uso delle resistenze elettriche. Inoltre, dalle prove è emerso che la distribuzione della potenza dissipata nei sali non è uniforme, con un gradiente verticale che diminuisce con la quota, come previsto dai modelli sviluppati nella LA1.16 dal Politecnico di Torino.

I risultati incoraggianti ottenuti dalla verifica sperimentale del concept di riscaldamento elettrico proposto, caratterizzato da elevata efficienza e controllo, aprono concettualmente la strada a diversi possibili ricadute sul sistema elettrico e produttivo nazionale: (i) sviluppo di sistemi da accumulo elettro-termico avanzati (hub energetici) capaci di accettare e accumulare non solo calore ma anche elettricità a basso costo, contribuendo alla stabilizzazione della rete elettrica nazionale e alla riduzione del consumo delle fonti fossili nelle ore di picco; (ii) decarbonizzazione dei processi industriali energivori difficilmente elettrificabili, ad oggi alimentati esclusivamente dal calore prodotto dai combustibili fossili; (iii) posizionamento strategico della ricerca italiana nello sviluppo di nuove tecnologie per l'energia e l'industria, con la generazione di know-how, brevetti e la possibile creazione di nuove aziende specializzate; (iv) valorizzazione e trasferimento della tecnologia di accumulo a sali fusi in diversi settori energivori, quali il riciclo di materiali o il trattamento di rifiuti, con potenziali benefici ambientali ed economici.

Tematica scientifico-applicativa "soluzioni tecniche e procedure operative per il settore industriale del CSP".

- Nell'ambito della linea di ricerca sulle "procedure operative per impianti CSP con fluido termovettore costituito da miscele di sali fusi bassofondenti e studio della compatibilità dei materiali a contatto con le miscele in condizioni reali di funzionamento", nel 2° semestre 2024 è proseguita ed è stata portata a termine la LA1.23 avente per oggetto le "prove di circolazione delle miscele di sali fusi bassofondenti per applicazioni a media e ad alta temperatura, messa a punto di procedure operative per la gestione delle miscele e prove di compatibilità dei materiali".

Nella LA1.23, nel corso del 2° semestre 2024, sono state eseguite sul circuito “MoSE” (Molten Salt Experiments) del C.R. ENEA di Casaccia le prove di compatibilità dei materiali, sia con ciclaggio termico che in condizioni isoterme, per valutare l’effetto della corrosione su provini di acciai austenitici AISI 347H e AISI 304, saldati e non saldati, posti a contatto con la miscela di sali bassofondente ternaria Na/K/Li//NO₃ selezionata per applicazioni ad alta temperatura (400-600 °C). Analogamente alle operazioni svolte nel precedente semestre per testare la miscela quaternaria, è stato fermato e riavviato il circuito per permettere l’estrazione dei provini in tre differenti momenti così da poter studiare l’evolversi nel tempo del fenomeno corrosivo. Durante le fermate e ripartenze del circuito è stato studiato il comportamento dello stesso durante i cambiamenti di fase della miscela di sali, confrontandolo con quanto osservato per la miscela quaternaria testata in precedenza. Alla conclusione delle prove le due miscele di sali, la quaternaria e la ternaria, sono state post-caratterizzate verificandone i punti di fusione con metodi reometrici, la composizione chimica con cromatografia ionica e la purezza chimico-fisica con tecnica MP-AES: non si sono evidenziate variazioni delle proprietà chimico fisiche delle miscele in esame durante i test di corrosione e, pertanto, le due miscele di sali risultavano non degradate termicamente. Per quanto riguarda l’esito dei test di corrosione, che sono stati effettuati in condizioni dinamiche dei sali, gli acciai A516 Gr.70 (P355NH), AISI 304 e AISI 347H non sono risultati compatibili per la realizzazione di componenti di impianto nell’intervallo di temperature 150-300 °C e 350-500 °C, con riferimento sia alla miscela quaternaria sia a quella ternaria. Questo perché dall’analisi della morfologia dello strato di ossido formatosi sulla superficie dei provini testati e della sua caratterizzazione chimica, in carico all’Università di Roma Tor Vergata (LA1.24), sono emerse evidenze di alterazioni superficiali dovute a fenomeni di corrosione. I risultati ottenuti forniscono comunque importanti indicazioni per la selezione dei materiali in componenti di impianti operanti ad alte temperature. Sebbene i materiali testati presentino limitazioni in tali condizioni, l’acciaio al carbonio si configura come una valida opzione per la bassa temperatura (T<250 °C), soprattutto in combinazione con la miscela bassofondente, grazie anche al suo vantaggio economico rispetto agli acciai austenitici. Per questi, ulteriori indagini sperimentali in presenza di nitrato di litio sono necessarie per confermarne l’idoneità operativa. Infine, l’applicazione di coating ceramici sulla superficie degli acciai rappresenta una soluzione promettente per migliorare la resistenza alla corrosione in ambienti ad elevata aggressività chimica. La sperimentazione condotta nella LA1.24 ha, infine, consentito di aggiornare le procedure operative, nelle condizioni di funzionamento ordinarie e di emergenza testate, per impianti CSP a sali fusi di scala commerciale a media e alta temperatura di esercizio. In particolare, sono state aggiornate e testate sul circuito “MoSE”: (i) le procedure (definite nella LA1.21) di primo caricamento di un serbatoio di stoccaggio dei sali, di fusione della miscela di sali e circolazione nel piping, impiegando la miscela di sali ternaria Na/K/Li//NO₃ per alta temperatura in luogo di quella quaternaria Na/K/Ca/Li//NO₃ per media temperatura; (ii) le procedure operative da adottare in caso d’indesiderato congelamento e successiva fusione della miscela di sali, impiegando sia la miscela quaternaria per media temperatura che la ternaria per alta temperatura. In merito a queste ultime procedure, sono state simulate sul “MoSE” (spegnendo la caldaia elettrica, tutti i sistemi di riscaldamento ausiliari e, in ultimo, le tracciate elettriche delle linee) le condizioni più gravose che si possono verificare in un impianto CSP a sali fusi di scala commerciale, ovvero mancanza di alimentazione di tutti i sistemi di riscaldamento delle linee e mancanza di circolazione del fluido, con conseguente congelamento parziale o totale della miscela di sali all’interno del piping.

Infine, nel 2° semestre 2024 è proseguita ed è stata portata a termine la LA1.26 avente per oggetto la “comunicazione e disseminazione dei risultati da Luglio 2023 a Dicembre 2024”.

Nell’ambito della LA1.26, nel corso del 2° semestre 2024, l’attività di comunicazione e disseminazione è stata realizzata, tra l’altro, mediante: partecipazione a n° 2 conferenze internazionali tra cui la “SolarPACES Conference 2024” (evento mondiale di riferimento della comunità del solare termico a concentrazione che si è tenuta in Italia, in particolare a Roma, nei giorni 8-11 Ottobre 2024, tornando in Europa dopo oltre un decennio di edizioni ospitate negli altri quattro continenti) a cui il Progetto ha partecipato in modo rilevante con uno stand, un “monolite” dedicato, numerosi abstract da cui sono scaturiti tutta una serie di lavori (poster, presentazioni orali e paper); partecipazione a 2 workshop, di cui 1 organizzato da CSEA

	nell'ambito di "ZeroEmission Mediterranean 2024 – International Conference and Exhibition"; organizzazione e partecipazione all'"Evento di disseminazione finale del Progetto 1.9 «Solare termodinamico» PTR 2022-2024 della Ricerca di Sistema", tenuto a Roma il 16 Dicembre 2024, che è il secondo dei 2 eventi disseminazione previsti dal capitolato di Progetto, a cui sono stati invitati rappresentanti degli stakeholder nazionali (industria e ricerca) e dei Ministeri competenti, e nell'ambito del quale sono stati presentati i risultati tecnico-scientifici ottenuti e i prodotti sviluppati nel Progetto e sono state individuate possibili future azioni di ricerca nel settore di riferimento, anche alla luce di quanto emerso nella "SolarPACES Conference 2024"; partecipazione a 2 meeting di comitati internazionali di riferimento del settore (tra cui un meeting del comitato esecutivo del "TCP IEA SolarPACES"); partecipazione a un evento divulgativo/di comunicazione aperto ai cittadini; organizzazione del meeting finale di Progetto. Inoltre, l'attività di disseminazione è stata realizzata, nel semestre in oggetto, mediante: pubblicazione di 4 articoli su riviste scientifiche internazionali indicizzate e di 2 articoli su atti di conferenza internazionale; sottomissione di ulteriori 3 articoli per la pubblicazione su riviste scientifiche internazionali indicizzate e di 2 articoli per la pubblicazione su atti di conferenza internazionale (i 5 articoli sottomessi sono fase di revisione); imminente sottomissione di ulteriori 2 articoli (già ultimati) per la pubblicazione su riviste scientifiche internazionali indicizzate; supporto all'aggiornamento della nuova sezione dedicata alla Ricerca di Sistema elettrico del sito web ENEA. Infine, la divulgazione dei risultati finali di Progetto è stata effettuata mediante l'emissione, in occasione del SAL-2 di Progetto, di 18 report specifici per le diverse LA svolte e completate nella seconda metà del triennio di Progetto; tali report saranno resi pubblici, dopo valutazione degli Esperti, nella suddetta sezione dedicata alla RdS del sito web ENEA. Le modalità di realizzazione dell'attività di comunicazione e disseminazione nell'intero triennio di Progetto (LA1.25 e LA1.26) hanno consentito di ottenere i seguenti risultati: - è stata data buona visibilità al Progetto e ne è stata pubblicizzata la fonte di finanziamento; - è stata curata la condivisione di informazioni su attività e risultati della ricerca di Progetto tra il personale (ENEA e delle Università co-beneficiarie) che ha lavorato al Progetto; - è stata effettuata la disseminazione dei risultati della ricerca di Progetto nell'ambito della comunità scientifica nazionale e internazionale; - è stata rafforzata la presenza in network specialistici di esperti, l'interazione e lo scambio di informazioni e conoscenze sui temi di ricerca specifici con le principali organizzazioni e associazioni internazionali di riferimento (es. IEA, EERA) e con programmi e progetti internazionali (es. TCP IEA SolarPACES, EERA JP CSP), anche partecipando a comitati e gruppi di lavoro specifici (es. ExCo TCP IEA SolarPACES); - è stato curato il costante aggiornamento sulle problematiche attuali e sulle nuove esigenze connesse all'evoluzione delle tecnologie CSP in ambito internazionale; - si è interagito con gli stakeholder industriali in merito alla percezione del valore aggiunto e dell'innovatività dei risultati della ricerca di Progetto (con particolare riferimento a quelli maggiormente applicativi); - si è interagito con gli stakeholder industriali nazionali in merito alle problematiche che ostacolano una più ampia diffusione delle tecnologie CSP nel Paese. Un ulteriore risultato dell'attività di comunicazione e disseminazione, a cui si è lavorato in modo proficuo, è il consolidamento della rete italiana degli stakeholder del settore che, dopo lo scioglimento nel 2019 di ANEST (Associazione Nazionale per l'Energia Solare Termodinamica), ha ripreso a incontrarsi in occasione di tutta una serie di eventi promossi da ENEA nell'ambito del Progetto.
Politecnico di Milano [PoliMI] Dipartimento di Energia	Facendo riferimento alla struttura del Progetto 1.9 "Solare termodinamico", sono di seguito descritte le attività svolte nel 2° semestre 2024 dal Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano (PoliMI). Tematica scientifico-applicativa "ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili". - Nell'ambito della linea di ricerca sulla "simulazione e ottimizzazione di impianti ibridi CSP/PV/Eolici di scala medio-piccola operanti sui mercati MGP e MSD", nel 2° semestre 2024 è proseguita ed è stata portata a termine la LA1.19 avente per oggetto la "simulazione e

	ottimizzazione di impianti ibridi CSP/PV/Eolici di scala medio-piccola operanti sul Mercato del Giorno Prima (MGP) e sul Mercato dei Servizi di Dispacciamento (MSD)". Nella LA1.19, nel corso del 2° semestre 2024, sono state valutate le prestazioni di un ipotetico impianto ibridizzato tra CSP, PV ed Eolico operante sul Mercato elettrico del Giorno Prima (MGP) nel 2030 e nel 2040. L'andamento dei prezzi dell'MGP al 2030 ed al 2040 è stato ottenuto con un modello di regressione in grado di stimare i prezzi in funzione del costo atteso del gas naturale ed in funzione del carico residuo previsto. Tale modello è stato calibrato sui dati storici del prezzo dell'elettricità sul MGP dal 2015 al 2021 (2020 escluso), mentre la domanda elettrica è stata riscalata secondo le previsioni di crescita del consumo elettrico nazionale e i costi delle singole tecnologie sono stati ridotti secondo quanto previsto dall'"Annual Technology Baseline" dell'NREL. I risultati a diverso livello di copertura del carico elettrico mostrano come PV ed Eolico rimangano le tecnologie più competitive fino a livelli di dispacciabilità (DL) medio-alti (50-60%), mentre per DL maggiori (> 65%), il CSP rimane una tecnologia essenziale per contenere i costi di generazione. I risultati mostrano, in questo caso, NPV positivo fino a DL del 75%, ottenuto grazie alla riduzione prevista dei costi delle diverse tecnologie.
Politecnico di Torino [PoliTO] Dipartimento Energia	Facendo riferimento alla struttura del Progetto 1.9 "Solare termodinamico", sono di seguito descritte le attività svolte nel 2° semestre 2024 dal Dipartimento Energia del Politecnico di Torino (PoliTO). Tematica scientifico-applicativa "ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili". - Nell'ambito della linea di ricerca sui "sistemi di accumulo termico, di tipo termoclino, ibridizzati alimentabili da CSP e da altre tecnologie energetiche rinnovabili, per la produzione di calore per processi industriali", nel 2° semestre 2024 è proseguita ed è stata portata a termine la LA1.14 avente per oggetto lo "sviluppo di un modello numerico di un sistema di accumulo termoclino ibridizzato con due serpentine e resistenze elettriche immerse nei sali: confronto con il sistema termoclino ibridizzato con tre serpentine e caldaia elettrica". Nella LA1.14, nel corso del 2° semestre 2024, delle due configurazioni di sistema di accumulo termoclino ibridizzato con resistenze elettriche immerse, identificate nel 2° semestre 2023, ovvero (i) sistema con resistenza a serpentina conica disposta sotto la serpentina di carica connessa all'impianto CSP e (ii) sistema con resistenze elicoidali disposte in una intercapedine cilindrica concentrica al serbatoio di accumulo (aperta nella parte alta e bassa del serbatoio) ottenuta tra la parete del serbatoio ed una parete interna, è stata considerata la seconda per la quale è stato portato a termine lo sviluppo di un modello termo-fluidodinamico (CFD), per mezzo del software Star-CCM+. La disposizione e la geometria delle resistenze sono state oggetto di un'ulteriore ottimizzazione, affinando la configurazione già definita nel 2° semestre 2023, con impiego di resistenze costituite da 2 bobine a spirale cilindrica in parallelo, sfalsate tra loro, con diametro commerciale $d = 3/8"$ e con passo longitudinale e trasversale tali da massimizzare il coefficiente di scambio termico convettivo tra la superficie delle resistenze e i sali fusi. È stato effettuato un confronto, per un dato transitorio di carica, tra le prestazioni termiche del sistema di accumulo termoclino ibridizzato dotato 3 serpentine (LA1.11, LA1.12 e LA1.13) con quelle del sistema con resistenze elettriche immerse, ottenendo i seguenti risultati: entrambi i sistemi di accumulo non presentano una chiara separazione tra la zona dei sali caldi e la zona dei sali freddi (stratificazione termica lontana da quella ideale del termoclino); nel sistema con resistenze immerse, i sali sotto al livello dell'intercapedine in cui sono collocate le bobine non partecipano al moto di convezione naturale e rimangono freddi; il sistema con resistenze immerse risulta meno performante di quello con 3 serpentine in termini di gradiente termico (che è ancora più piatto). Tali risultati indicano che, per il sistema con resistenze elettriche immerse, è necessario implementare soluzioni progettuali per aumentare significativamente l'impedenza idraulica dell'intercapedine in cui sono collocate le bobine per ottenere un sistema di accumulo termoclino performante. - Nell'ambito della linea di ricerca sui "sistemi innovativi di riscaldamento elettrico dei sali fusi per l'ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili", nel 2° semestre

	2024 è proseguita ed è stata portata a termine la LA1.18 avente per oggetto l'“analisi numerica del potenziale applicativo di una tecnologia innovativa di riscaldamento elettrico dei sali fusi”. Nella LA1.18, nel corso del 2° semestre 2024, tra le possibili soluzioni individuate nel 2° semestre 2023 per implementare la tecnologia del riscaldamento elettrico dei sali, mediante microonde, in sistemi di accumulo termico ad alta temperatura (fino a 550 °C) di dimensioni reali, è stata selezionata e sviluppata quella che prevede: configurazione del sistema di accumulo di tipo termoclino indiretto ad alta temperatura di scala significativa, basato sul design proposto nelle LA1.11, LA1.12, LA1.13, LA1.14 (una serpentina di carica da CSP, una di scarica, un canale verticale che collega le 2 serpentine e guida il movimento dei sali durante la carica/scarica); mezzo di accumulo costituito dalla miscela binaria “Solar Salt”; integrazione del sistema di riscaldamento elettrico dei sali fusi con microonde convogliate, mediante guide d'onda collegate a dei magnetron (alimentabili da PV), a una cavità risonante cilindrica posizionata sotto la serpentina di carica; cavità risonante con pareti in acciaio e piastra superiore di materiale ceramico (che permette di dissipare l'energia delle microonde nei sali fusi) e volume riscaldato dalle microonde compreso tra piastra ceramica e serpentina di carica. Per tale sistema di accumulo termoclino indiretto alimentato da energia termica ed elettrica e dotato della tecnologia di riscaldamento elettrico dei sali fusi mediante microonde, è stato sviluppato, mediante il software Star-CCM+, un modello CFD. Nella fattispecie, si è simulata la presenza di una cavità risonante che consente di dissipare le microonde nei sali, realizzando un preriscaldamento prima che i sali entrino nella serpentina di carica. La geometria del sistema di riscaldamento è stata oggetto di una prima ottimizzazione sulla base dei risultati ottenuti dalle simulazioni termo-fluidodinamiche. Le prestazioni termiche del sistema sono state valutate per diversi profili di carica. In particolare, si è simulato un transitorio di carica in cui il riscaldamento elettrico dei sali avviene in contemporanea al riscaldamento termico: in questo caso, la maggiore potenza scaricata nei sali porta a un aumento della temperatura del fluido che risale lungo il canale verticale che, a sua volta, determina un aumento delle forze di galleggiamento e quindi della portata dei sali nel canale.
Università degli Studi di Firenze [UniFI] Dipartimento di Ingegneria Industriale	Facendo riferimento alla struttura del Progetto 1.9 “Solare termodinamico”, sono di seguito descritte le attività svolte nel 2° semestre 2024 dal Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Firenze (UniFI). Tematica scientifico-applicativa “materiali e componenti avanzati per impianti CSP”. - Nell'ambito della linea di ricerca sulla “tecnologia micro-CSP basata su sistemi di tipo micro-PTC per la generazione distribuita di energia in contesti civili e industriali”, nel 2° semestre 2024 è proseguita ed è stata porta a termine la LA1.6 avente per oggetto lo “studio progettuale di up-grade del sistema micro-PTC innovativo di UniFI per il suo impiego per la cogenerazione di calore di processo a media temperatura e di energia elettrica con un ciclo ORC”. Nella LA1.6, nel corso del 2° semestre 2024, UniFI ha supportato ENEA che, nella LA1.5, ha caratterizzato sperimentalmente il prototipo di sistema micro-PTC sviluppato da UniFI in attività di ricerca antecedenti a quelle di Progetto. Inoltre, in continuità con le attività iniziate nel semestre precedente, mediante simulazioni numeriche basate sul Metodo degli Elementi Finiti (FEM), è stato condotto uno studio progettuale di up-grade volto a valutare e superare le criticità del sistema micro-PTC di UniFI, con particolare riferimento a quelle rilevate nella LA1.5 e con special riguardo alle elevate dispersioni termiche del tubo ricevitore. In particolare, mediante le simulazioni numeriche, è stato stimato che un notevole incremento dell'efficienza termica del micro-PTC, compreso tra +10 % e +15 % rispetto a quella attuale (pari a circa 40% a 270 °C), è ottenibile mediante la riduzione dell'emissività termica del coating solare del tubo ricevitore da $\epsilon_h > 10\%$ a $T \geq 200$ °C, che è il valore del coating del componente in dotazione al micro-PTC, a un valore di riferimento di $\epsilon_h < 10\%$ a $T = 300$ °C. Più in generale, le simulazioni numeriche condotte hanno consentito di individuare possibili soluzioni tecniche migliorative del micro-PTC di UniFI, con il seguente ordine di priorità: (1) miglioramento del tubo ricevitore con implementazione di coating solari per la media temperatura (fino a 350 °C) con valori di ϵ_h almeno pari a quello di riferimento sopra indicato o più bassi; (2) miglioramento del sistema di tracking, con aggiornamento a livello di sw e hd,

per incrementare l'accuratezza del puntamento e l'efficienza ottica del sistema; (3) miglioramento del concentratore/riflettore parabolico con maggiore qualità del profilo parabolico (attualmente ottenuto da una sottile lamiera di acciaio inox piegata) per aumentare l'intercept factor e reperimento di un'alternativa, con elevate caratteristiche riflettenti, alla pellicola ReflecTech (riflettanza speculare 96%) attualmente impiegata e non più disponibile in commercio; (4) miglioramenti a livello costruttivo/di assemblaggio del collettore micro-PTC con riprogettazione del layout per impianti di dimensioni estese (es. possibilità di sostituzione dei tubi ricevitori da entrambe le estremità, evitando di dover passare necessariamente dal lato con mandata/ritorno isolati). Per valutare l'impatto energetico ed economico dell'impiego di una "versione up-grade" del micro-PTC di UniFI che prevede il miglioramento del solo coating del tubo ricevitore, è stata riconsiderata la modellazione dinamica in TRNSYS 18 dei casi studio precedentemente analizzati nella LA1.4, ipotizzando che le prestazioni fototermiche del coating siano pari a quelle del coating del tubo ricevitore commerciale Schott PTR 70 (versione anno 2008) ovvero $\alpha_s \approx 96\%$ e $\epsilon_h \approx 9\%$ a 300 °C. In merito all'applicazione del sistema micro-PTC di UniFI per la produzione di calore di processo a media temperatura in ambito industriale, per il primo caso studio della lavanderia industriale con richiesta di vapore a 160 °C, l'impiego della "versione up-grade" del micro-PTC di UniFI comporta un aumento relativo della Solar Fraction (SF) di circa il 50% rispetto alla configurazione originaria del micro-PTC, portando il valore del SF al di sopra del 70% per tutti i siti considerati, con una differenza massima del 7% tra Palermo e Firenze; l'LCOH risulta ovunque minore di 0.10 €/kWh, mantenendo un andamento coerente con quello della SF. Analoghi benefici si sono riscontrati nel secondo caso studio, relativo all'industria metalmeccanica con processi produttivi fino a 700 °C, per cui è stato ipotizzato l'impiego del micro-PTC per la fase di pre-riscaldamento fino a 350 °C; l'adozione del nuovo coating consente un aumento relativo della SF maggiore del 100% rispetto alla LA1.4, portando il valore del SF al di sopra del 70% per tutti i siti considerati, con una differenza massima del 10% tra Palermo e Firenze; l'LCOH risulta compreso tra 0.10 €/kWh (Palermo) e 0.13 €/kWh (Firenze). In merito all'applicazione del sistema micro-PTC di UniFI per la produzione di energia frigorifera in ambito civile, riconsiderando il terzo caso studio dell'utenza residenziale costituita dal complesso di edilizia popolare in classe energetica A4, l'abbinamento del micro-PTC in "versione up-grade" a un chiller ad assorbimento porta la SF per l'acqua calda sanitaria (ACS) intorno al 50% per tutti i siti; l'aumento relativo della produzione di energia frigorifera è intorno al 20/30% con un valore assoluto di circa 70 MWh/anno di energia frigorifera prodotta per tutti i siti (60 MWh/anno per la sola Firenze), con rese specifiche per m² di micro-PTC comprese tra 427 e 533 kWh/m²/anno e un LCOH ridotto e compreso tra 0.107 €/kWh (Palermo) e 0,128 €/kWh (Firenze). Il confronto tra la tecnologia micro-PTC + chiller ad adsorbimento con PV abbinato a una pompa di calore a compressione (PDC) ha mostrato performance ormai molto vicine con una maggior produzione da PV + PDC tra il 2% e il 20% (la differenza nella LA1.4 era ancora tra il 16% e il 33%). Infine, in merito all'applicazione del sistema micro-PTC di UniFI in "versione up-grade" con coating del tubo ricevitore migliorato per la produzione di energia elettrica, riconsiderando il quarto caso studio che prevedeva di produrre elettricità in ambito industriale tramite una macchina a Ciclo Rankine Organico (ORC) "alimentata" dal micro-PTC, rispetto alla LA1.4 si registrano un aumento relativo dell'efficienza di conversione solare-elettrico del 160%, con valori assoluti di efficienza intorno al 16%, e una riduzione dell'LCOE di circa il 60%, con valori scesi al di sotto di 0,6 €/kWh (da 0,59 €/kWh a Firenze a 0,46 €/kWh a Palermo). Chiaramente, a fronte di tali netti miglioramenti, l'LCOE rimane ancora superiore a quello di un impianto PV di taglia analoga. In conclusione, il miglioramento anche del solo coating del tubo ricevitore per ottenere una "versione up-grade" del sistema micro-PTC di UniFI ha dimostrato un impatto significativo sia sul piano energetico sia su quello economico, rendendo il micro-PTC di UniFI ancor più competitivo (a qualunque latitudine del territorio nazionale) per la produzione di calore a media temperatura, aprendo prospettive concrete per l'applicazione in processi industriali e nel settore della refrigerazione solare e potendo, pertanto, giocare un ruolo chiave nella decarbonizzazione di aree fortemente antropizzate. Per sfruttare appieno queste potenzialità, oltre all'effettiva implementazione di tubi ricevitori evacuati con coating solare migliorato, sarà però indispensabile procedere parallelamente con l'ottimizzazione del sistema di tracking, dei concentratori/riflettori e dei processi costruttivi del micro-PTC (da processi manuali, per la realizzazione di prototipi, a industriali, con ottenimento di economie

	di scala), al fine di tradurre i vantaggi prospettati delle simulazioni numeriche in performance reali e riproducibili su larga scala. A fronte delle potenzialità dell'impiego del micro-PTC di UniFI su scala nazionale per la produzione di calore a media temperatura, la tecnologia micro-PTC + macchina ORC non risulta allo stato attuale competitiva per la produzione di energia elettrica rinnovabile rispetto a tecnologie FER più mature quali, in primis, il PV.
Università degli Studi di Napoli Federico II [UniNA] Dipartimento di Ingegneria Industriale	Facendo riferimento alla struttura del Progetto 1.9 "Solare termodinamico", sono di seguito descritte le attività svolte nel 2° semestre 2024 dal Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Napoli Federico II (UniNA). Tematica scientifico-applicativa "soluzioni tecniche e procedure operative per il settore industriale del CSP". - Nell'ambito della linea di ricerca sulle "tecnologie ad ultrasuoni per sistemi di rilevazione di occlusioni solide all'interno del piping di impianti CSP utilizzando miscele di sali fusi come fluido termovettore", nel 2° semestre 2024 è proseguita ed è stata porta a termine la LA1.20 avente per oggetto l'"utilizzo di tecnologie ad ultrasuoni per la rilevazione di occlusioni solide all'interno del piping di impianti CSP utilizzando miscele di sali fusi come fluido termovettore". Nella LA1.20, nel corso del 2° semestre 2024, i risultati delle simulazioni eseguite e la metodologia di analisi specificatamente sviluppata nel corso dei precedenti semestri hanno fornito indicazioni incoraggianti per lo studio della configurazione preliminare (progetto di massima) di un dispositivo prototipale di diagnosi ad ultrasuoni per la rilevazione di inclusioni/occlusioni di sali solidificati (presenza, posizione e dimensioni) nel piping di impianti CSP a sali fusi, fornendo, altresì, indicazioni fondamentali in grado di condizionare scelte importanti per la realizzazione del dispositivo. Sono stati valutati diversi meccanismi/modalità di trasduzione per l'emettitore e il ricevitore di ultrasuoni (piezoelettrico, magnetostrittivo, scarica elettrica, elettromagnetico, laser ed elettrostatico), selezionando trasduttori ad ultrasuoni piezoelettrici ceramici (PZT), con frequenza operativa 1-3 MHz, per la loro alta sensibilità, compatibilità di impedenza e robustezza operativa ad alta temperatura (fino a 350 °C, con opportuno isolamento termico). Il sistema di diagnosi prevede l'impiego di 2 trasduttori a ultrasuoni: un emettitore, che invia l'onda ultrasonica nel fluido, e un ricevitore, opposto all'emettitore e posizionato in modo ottimale per rilevare eventuali attenuazioni del segnale; il segnale rilevato viene elaborato da un modulo di acquisizione dati e analizzato da un software dedicato che stima la probabilità di presenza di inclusioni sulla base dell'attenuazione dell'onda ultrasonica. Sono stati determinati, in linea di massima, la componentistica necessaria e le rispettive specifiche tecniche, ed è stato stimato il costo del prototipo di dispositivo, pari a circa 50-60 k€. Lo sviluppo di soluzioni tecniche, basate sull'impiego di ultrasuoni, per la diagnosi della presenza di occlusioni solide nel piping di impianti CSP a sali fusi, nonché di procedure per la gestione operativa degli stessi, supportando e promuovendo la diffusione di tecnologie CSP basate sull'impiego di miscele di sali fusi (sicure e non dannose per l'ambiente) come fluidi termovettori e mezzi di accumulo in luogo dei comuni oli diatermici (infiammabili e inquinanti) potrà contribuire ad agevolare la transizione del sistema energetico verso l'impiego di impianti di produzione dell'energia elettrica caratterizzati da un impatto ambientale contenuto.
Università degli Studi di Palermo [UniPA] Dipartimento di Ingegneria	Facendo riferimento alla struttura del Progetto 1.9 "Solare termodinamico", sono di seguito descritte le attività svolte nel 2° semestre 2024 dal Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi di Palermo (UniPA). Tematica scientifico-applicativa "materiali e componenti avanzati per impianti CSP". - Nell'ambito della linea di ricerca sui "coating innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti CSP a collettori lineari", nel 2° semestre 2024 è proseguita ed è stata completata l'attività di ricerca pianificata nella LA1.3 avente per oggetto lo "studio morfologico, strutturale e compositivo di materiali e strutture multistrato per coating innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti micro-PTC a media temperatura e di impianti CSP ad alta temperatura".

	Nella LA1.3, nel corso del 2° semestre 2024, UniPA ha condotto analisi morfologiche e strutturali dei materiali e delle strutture multistrato, sviluppate da ENEA nella LA1.1, idonee ad essere utilizzate per la preparazione di coating solari ad alte prestazioni per tubi ricevitori evacuati di impianti CSP operanti ad alta temperatura (550 °C), realizzati da ENEA nella LA1.2. Le analisi SEM ed EDS in piano, effettuate su coating as-grown e sottoposti a test di annealing in vuoto a temperature crescenti (550, 620, 650 e 690 °C), hanno evidenziato: (i) variazione della dimensione dei grani, a seguito di trattamenti termici, tale da non inficiare la stabilità strutturale dei coating; (ii) struttura pressoché invariata; (iii) morfologia superficiale stabile; (iv) strato barriera di AlN che riesce a limitare sensibilmente la cinetica di diffusione dell'Ag a 550 °C. Pertanto, i nuovi coating solari realizzati presentavano proprietà strutturali idonee per essere utilizzati con elevata stabilità in applicazioni in vuoto alla temperatura operativa di 550 °C permettendo una più agevole e quindi più economica gestione dell'impianto CSP.
Università degli Studi di Roma Tor Vergata [UniRM2] Centro Interdipartimentale Nanoscienze, Nanotecnologie e Strumentazione Avanzata	Facendo riferimento alla struttura del Progetto 1.9 "Solare termodinamico", sono di seguito descritte le attività svolte nel 2° semestre 2024 dal Centro Interdipartimentale Nanoscienze, Nanotecnologie e Strumentazione Avanzata (NAST) dell'Università degli Studi di Roma Tor Vergata (UniRM2). Tematica scientifico-applicativa "soluzioni tecniche e procedure operative per il settore industriale del CSP". - Nell'ambito della linea di ricerca sulle "procedure operative per impianti CSP con fluido termovettore costituito da miscele di sali fusi bassofondenti e studio della compatibilità dei materiali a contatto con le miscele in condizioni reali di funzionamento", nel 2° semestre 2024 è proseguita ed è stata portata a termine la LA1.24 avente per oggetto la "verifica in condizioni reali di funzionamento delle miscele di sali fusi bassofondenti operanti a media temperatura e ad alta temperatura: analisi metallografiche dei materiali sottoposti a test di compatibilità". Nel corso del 2° semestre del 2024, nell'ambito della LA 1.24, UniRM2 ha completato l'attività (iniziata nel precedente semestre) focalizzata sulle analisi metallografiche dei provini di acciaio al C P355NH (A516 Gr.70), saldati e non saldati, che ENEA ha sottoposto nella LA1.23 a test di corrosione dinamica ponendoli a contatto, nel circuito "MoSE" (Molten Salt Experiments) del C.R. ENEA di Casaccia, con la miscela quaternaria di sali fusi bassofondente Na/K/Ca/Li//NO₃ selezionata per operare a media temperatura (200-400 °C). In particolare, è stata condotta una seconda fase di attività che ha previsto: rimozione dei prodotti di corrosione mediante descaling chimico dei provini metallici forniti da ENEA, seguendo il protocollo UNI-ISO 17245:2015 - C.3.4; ripetizione delle analisi SEM/EDS ed XRD sui provini delle leghe metalliche privi di depositi di corrosione, studio di eventuali processi degenerativi e confronto della morfologia con quella dei provini vergini analizzati nella precedente LA1.22; nuova stima dei pesi dei singoli provini post-descaling per valutare la velocità di corrosione, espressa come variazione di peso del provino in funzione del tempo di immersione nelle miscele di sali fusi. L'attività condotta da UniRM2 si è, quindi, focalizzata sulle analisi metallografiche dei provini di acciai austenitici AISI 347H e AISI 304, saldati e non saldati, che ENEA ha sottoposto nella LA1.23 a test di corrosione dinamica ponendoli a contatto, nel circuito "MoSE", con la miscela ternaria di sali fusi bassofondente Na/K/Li//NO₃ selezionata per operare ad alta temperatura (400-600 °C). Analogamente a quanto fatto per i provini di acciaio al C, l'attività è stata condotta in due fasi. La prima fase di attività ha previsto: catalogazione dei provini in funzione del tempo e delle temperature di immersione; stima dei pesi e delle aree dei singoli provini ai fini del calcolo di variazione di spessore pre e post test; analisi SEM sulle superfici dei provini per valutare le tipologie di ossidi presenti (morfologia, spessore e composizione degli strati fino alla matrice della lega metallica); analisi EDS per ottenere le mappature delle superfici metalliche e per studiarne l'omogeneità; analisi XRD, per analizzare la composizione delle fasi solide negli strati ossidati e fornire informazioni complementari. La seconda fase di attività ha previsto: rimozione dei prodotti di corrosione mediante descaling chimico dei provini metallici forniti da ENEA, seguendo il protocollo UNI-ISO 17245:2015 - C.7.10; ripetizione delle analisi SEM/EDS ed XRD sui provini delle leghe metalliche privi di depositi di corrosione, studio di eventuali processi degenerativi e confronto della morfologia con quella dei provini vergini analizzati nella precedente LA1.22; nuova stima dei pesi dei singoli provini post-descaling per valutare la velocità di corrosione,

	espressa come variazione di peso del provino in funzione del tempo di immersione nelle miscele di sali fusi. L'analisi di valutazione della compatibilità delle leghe di acciaio per l'utilizzo in impianti CSP operanti a media e alta temperatura e che impiegano le miscele di sali bassofondenti selezionate ha portato alle seguenti conclusioni. L'estesa campagna di indagini eseguite sulle superfici dei provini di acciaio dopo ogni test di compatibilità dinamica a circa 300 h, 800 h e 1200 h di esercizio immersi nei sali fusi, a medie e alte temperature, ha evidenziato un'ampia corrosione, diffusa su tutti i provini e ancor più importante sulle saldature e sulle zone di contatto tra la saldatura e la matrice. Questa corrosione ha conseguenze diverse dipendenti dal tipo di acciaio: è di natura generalizzata con crateri e caverne anche molto ampie e profonde nell'acciaio P355NH; è di natura intergranulare e successivamente di pitting diffuso e profondo nell'acciaio AISI 347H; è di natura intergranulare estesa e di pitting diffuso soprattutto sulle saldature nell'acciaio AISI 304. Dall'analisi approfondita dei dati risultanti dalla caratterizzazione XRD e SEM/EDS e in accordo con i dati provenienti dalla LA1.23 in carico ad ENEA, è possibile concludere che queste tipologie di acciaio si possono considerare non compatibili con le miscele di sali bassofondenti selezionate e, pertanto, non risultano idonei per l'impiego in componenti e/o sottosistemi di impianto con temperature di esercizio medie e alte.
--	---