

# PIANO TRIENNALE DI REALIZZAZIONE 2025-2027 DELLA RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO NAZIONALE

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

## Tema di ricerca 1.9

### Titolo del progetto

#### Solare Termodinamico

- Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile [ENEA]
- Politecnico di Milano [PoliMI]
- Politecnico di Torino [PoliTO]
- Università degli Studi di Firenze [UniFI]
- Università degli Studi di Napoli Federico II [UniNA]
- Università degli Studi di Palermo [UniPA]

**Durata del progetto: 36 mesi**

**Costo proposto: 2.500.000,00 €**

## 2. DATI GENERALI DEL PROGETTO

### 2.1 Dati progetto

**Titolo del progetto**

Solare Termodinamico

**Durata del progetto**

36 mesi

### 2.2 Descrizione progetto

**Abstract del progetto**

Il Progetto 1.9 "Solare Termodinamico" si propone di rendere disponibili materiali, componenti, dispositivi, sistemi, soluzioni tecniche e metodologie avanzate (i) per l'efficace ibridizzazione del solare a concentrazione, termodinamico (Concentrated Solar Power, CSP) e termico (Concentrated Solar Thermal, CST), con altre tecnologie da fonti energetiche rinnovabili (FER), (ii) funzionali alla digitalizzazione degli impianti CSP/CST e (iii) per l'integrazione degli impianti CSP/CST con le reti energetiche e con utenze industriali e/o civili, sia in applicazioni di generazione e co-generazione centralizzata che distribuita. L'obiettivo ultimo è incrementare la dispacciabilità dell'energia (elettrica e termica) prodotta da fonte solare, aumentare la versatilità di utilizzo degli impianti CSP/CST e ridurre il costo di generazione dell'energia mediante il miglioramento delle performance e la riduzione delle spese operative e di manutenzione (O&M).

Tenuto conto dei suddetti obiettivi, il Progetto, 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).

La prima tematica inerente a "Sistemi di accumulo termico per impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER e per la fornitura di energia su base stagionale" prevede 3 linee di ricerca:

- "Comparazione sperimentale tra sistemi di accumulo termico, di tipo termocline a sali fusi, per l'ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER" (LA1.1, LA1.2, LA1.3) - Sarà progettato e realizzato un nuovo prototipo di sistema di accumulo termocline a sali fusi ibridizzato, alimentabile da CSP/CST e da fotovoltaico (PV), ottenuto dall'up-grade del sistema realizzato nel precedente triennio prevedendo, rispetto a questo, l'utilizzo di resistenze elettriche di carica (alimentabili da PV) direttamente immerse nei sali in sostituzione di uno scambiatore di carica a olio diatermico (riscaldato da una caldaia elettrica alimentabile da PV). La sperimentazione del prototipo asservito all'impianto Fresnel "ENEA-SHIP" dell'ENEA, supportata da simulazione numerica, consentirà di effettuare una comparazione con la tecnologia sviluppata nel precedente triennio in termini di efficienza di storage e di trasferimento di energia da PV, velocità di carica, modularità, costi e semplicità di gestione.
- "Sistemi di riscaldamento elettrico a microonde dei sali fusi per l'ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER" (LA1.4, LA1.5, LA1.6) - Sarà applicata l'innovativa tecnologia di riscaldamento elettrico dei sali fusi a microonde (di tipo volumetrico), selezionata nel precedente triennio, su un dispositivo prototipale di accumulo termico, su scala di laboratorio, che verrà accessorizzato di un sistema sensoristico ad hoc per testare il dispositivo nelle condizioni operative ottimali precedentemente individuate. La sperimentazione di tale prototipo, supportata da simulazione numerica, sarà finalizzata a valutarne le prestazioni (es. dinamica di carica elettrica/termica, temperature operative ammissibili) con lo scopo di identificare le soluzioni tecniche più idonee in prospettiva di un futuro scale-up della tecnologia alla scala dell'ambiente industrialmente rilevante.
- "Sistemi di accumulo termico stagionali, di tipo termo-chimico a zeoliti, alimentabili da CST" (LA1.7, LA1.8) - Saranno studiati e sperimentati, utilizzando la facility di test "SUNSTORE" dell'ENEA opportunamente implementata con due nuovi reattori termo-chimici indipendenti, sistemi di accumulo termico stagionali basati sulle tecnologie delle zeoliti e operanti a temperature tra 90 e 250 °C, per applicazioni distribuite del CST (fornitura di calore a utenze industriali, teleriscaldamento).

La seconda tematica inerente a "Materiali e dispositivi per il monitoraggio degli impianti CSP/CST e l'innovazione dei processi O&M" prevede 2 linee di ricerca:

- "Sensori di sporco/failure degli specchi per la digitalizzazione del campo solare degli impianti CSP/CST" (LA1.9, LA1.10) - Per ottimizzare gli interventi di pulizia e manutenzione del campo solare, riducendone in modo significativo le spese O&M, i materiali dei rivestimenti autopulenti studiati nel precedente triennio verranno ulteriormente funzionalizzati, al fine di ottenere specchi solari dotati di prototipi di sensori piezoelettrici per la rilevazione dello sporco/failure che saranno testati sull'impianto Fresnel "ENEA-SHIP". Sarà inoltre sviluppato un prototipo "proof of concept" di sensore ottico per l'acquisizione di informazioni sul campo solare mediante sistemi di imaging UAS (Unmanned Aerial Systems).
- "Diagnosi a ultrasuoni per la rilevazione di occlusioni solide nel piping di impianti CSP/CST utilizzando miscele di sali fusi come fluido termovettore" (LA1.11, LA1.12) - Sulla base della configurazione preliminare studiata nel precedente triennio, si elaborerà il progetto di dettaglio di un innovativo dispositivo di diagnosi a ultrasuoni per la rilevazione di occlusioni di sali solidificati nel piping di impianti CSP/CST a sali fusi. Il dispositivo, realizzato in forma di prototipo, sarà sperimentato e messo a punto sul circuito "MoSE" (Molten Salt

Experiments) dell'ENEA e saranno predisposte linee guida per il suo utilizzo su impianti CSP/CST a sali fusi, anche di scala commerciale. La terza tematica inerente all'“Integrazione degli impianti CSP/CST in sistemi di poligenerazione distribuita asserviti a utenze industriali e civili” prevede 3 linee di ricerca:

- “Sistemi di cogenerazione distribuita, alimentati da impianti CSP/CST ibridizzati con PV, asserviti a utenze industriali e civili locali” (LA1.13, LA1.14, LA1.15, LA1.16, LA1.17) - Sarà sviluppato e sperimentato un dimostratore tecnologico (di tipo prototipale) di sistema di cogenerazione distribuita di elettricità e calore, alimentato da impianti solari a concentrazione e PV, asservito a utenze industriali e civili locali. Il dimostratore sarà realizzato implementando l'impianto Fresnel “ENEA-SHIP” e integrerà un sistema di accumulo termocline ibridizzato, alimentato dal preesistente campo solare Fresnel e da un impianto PV, allacciato a un sistema ORC e a una interfaccia di processo per la fornitura di energia a utenze locali del C.R. ENEA di Casaccia. Saranno sviluppati modelli predittivi della producibilità (elettrica/termica) di sottosistemi CSP/CST del dimostratore tecnologico attraverso tecniche di forecasting. Proseguirà, inoltre, lo sviluppo dell'innovativo sistema micro-PTC di UniFI per applicazioni di cogenerazione distribuita in contesti civili e industriali fortemente antropizzati, realizzandone un modulo prototipale in “versione up-grade” dotato di tubi ricevitori con coating solare ENEA di ultima generazione e che sarà testato collegandolo al dimostratore tecnologico.
  - “Analisi delle potenzialità degli impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER per la decarbonizzazione dell'industria” (LA1.18) - Saranno analizzate le prestazioni tecnico-economiche-ambientali di impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER per sistemi industriali cogenerativi di piccola e grande taglia, considerando anche l'effetto di fattori naturali ed antropici.
  - “Studio concettuale dell'utilizzazione di calore solare da impianti a concentrazione per la valorizzazione di matrici organiche residuali mediante processi pirolitici e coproduzione di elettricità” (LA1.19) - Le migliori strategie di accoppiamento tra processo pirolitico e impianto solare a concentrazione verranno formulate, analizzando anche lo scenario di co-produzione di elettricità, e saranno elaborate analisi di fattibilità e schemi dettagliati di processo utilizzabili in futuri progetti dimostrativi e impianti pilota.
- Infine, per monitorare l'avanzamento del Progetto e massimizzarne l'impatto, particolare cura sarà riservata alle attività di gestione del Progetto e di comunicazione e disseminazione dei risultati (LA1.20, LA1.21).

#### Abstract del progetto ENG

The “Solar Thermodynamic” 1.9 Project has the objective to make available materials, components, devices, systems, technical solutions and advanced methodologies (i) to effectively hybridize the CSP (Concentrated Solar Power) and CST (Concentrated Solar Thermal) with other technologies from renewable energy sources (RES), (ii) that are functional for the digitalization of CSP/CST plants and (iii) to integrate CSP/CST plants with energy networks as well as industrial and/or civil users, for application into centralized and distributed generation/cogeneration of energy. The final objective is to increase the dispatchability of energy (both electric and thermal) which is produced by solar source, as well as to increase the versatility of CSP/CST plants and, finally, reduce the cost of energy generation by improving performance and reducing operation and maintenance (O&M) costs of CSP/CST plants.

Taking into account the above-mentioned objectives, the Project, which is based on 1 work package (WP1), is organized in 3 scientific-applicative topics, which in turn include several research lines that are developed through activity lines (LA).

The first topic, related to “Thermal storage systems for CSP/CST plants hybridized with other RES technology and to supply energy on seasonal basis”, is articulated in 3 research lines:

- “Experimental comparison between molten salts thermochemical storage systems for the hybridization of CSP/CST with other RES technologies” (LA1.1, LA1.2, LA1.3) - A new prototype of hybrid molten salt thermochemical storage system, powered by CSP/CST and photovoltaic (PV), will be designed and built. This prototype will be obtained through the upgrade of the one built within the previous three-year period and will be characterized by charge electric heaters (connected to a PV plant) directly immersed into molten salts, which replace the charge exchanger with diathermic oil (heated by electric boiler powered by PV). The testing of the prototype connected to the Fresnel “ENEA-SHIP” plant, supported by numerical simulation, will allow comparing the actual technology with respect to one developed within the previous three-year period, in term of storage efficiency, as well as energy transfer from PV, charge rate, modularity, costs and easiness of management.
- “Electric microwave heating systems of molten salts for the hybridization of CSP/CST with other RES technologies” (LA1.4, LA1.5, LA1.6) - The innovative technology of electric heating of molten salts by microwaves (volumetric type), selected within the previous three-year period, will be applied to a laboratory-scale thermal storage prototype. This prototype will be equipped with a customized sensor system to test the device under the previously identified optimal operating conditions. The experimentation of this prototype, supported by numerical simulation, will be aimed at evaluating its performance (e.g., electrical/thermal charge dynamics, admissible operating temperatures) with the aim of identifying suitable technical solutions for a future scale-up of the technology to an industrially relevant environment.
- “Zeolite-based seasonal thermal storage systems powered by CST” (LA1.7, LA1.8) - Zeolite-based seasonal thermal storage systems, operating between 90 °C and 250 °C, will be studied and tested for distributed applications of CST (heat supply for industrial users, district heating) through “SUNSTORE” ENEA test facility, which is opportunely implemented with two new independent thermo-chemical reactors.

The second topic, concerning the “Materials and devices for monitoring CSP/CST plants and the innovation of O&M processes”, includes 2 research lines:

- “Fouling/failure sensors of mirrors to digitalize solar field of CSP/CST plants” (LA1.9, LA1.10) - In order to optimize cleaning and

maintenance interventions of the solar field, significantly reducing O&M costs, the self-cleaning materials, that were studied within the previous three-year period, will be further functionalized to the purpose of obtaining solar mirrors integrating piezoelectric prototypal sensors to detect fouling/failure that will be tested on Fresnel "ENEA-SHIP" plant. A "proof of concept" of an optical sensor prototype will be also developed to acquire, through imaging UAS (Unmanned Aerial Systems), information about solar field.

- "Ultrasonic diagnosis for solid occlusion detection in the piping of CSP/CST plants using mixture of molten salts as heat transfer fluid (LA1.11, LA1.12) – On the basis of preliminary configuration that was studied within previous three-year period, the detail design of an innovative ultrasonic diagnostic device for solid occlusion detection in the piping of molten salt CSP/CST plants will be developed. The device, which is realized as prototype, will be tested and fine-tuned on "MoSE" (Molten Salt Experiments) ENEA circuit, as well as guidelines will be elaborated about the relative use on CSP/CST plants with molten salts, including commercial scale ones.

The third topic, related to "Integration of CSP/CST plants into distributed polygeneration systems for industrial and civil users", includes 3 research lines:

- "Distributed cogeneration systems, powered by CSP/CST plants hybridized with PV, for local industrial and civil users" (LA1.13, LA1.14, LA1.15, LA1.16, LA1.17) – A technology demonstrator (prototype type) of distributed cogeneration system of electricity and heat, powered by concentrated solar plants hybridized with PV, will be developed and tested. This demonstrator will be built by implementing the Fresnel "ENEA-SHIP" plant; it will integrate a hybrid thermocline storage system, powered by the pre-existing Fresnel solar field and a PV system, that is connected to an ORC system and a process interface to supply energy to local users of ENEA Casaccia Research Centre. Predictive models about reproducibility (electric/thermal) of CSP/CST subsystems of technology demonstrator will be developed through forecasting techniques. Moreover, the development of the innovative UniFI micro-PTC system will go on for distributed cogeneration applications into highly anthropized civil and industrial contexts. A prototype module of the UniFI micro-PTC in "upgrade version" (having receiver tubes with the latest generation ENEA solar coating) will be realized and tested by connecting it to the technology demonstrator.

- "Analysis of the potential of CSP/CST plants hybridized with other RES technology for the decarbonization of industry" (LA1.18) – Technical-economic-environmental performances of CSP/CST plants hybridized with other RES technologies will be analysed for small and large size cogeneration industrial systems, also considering natural and anthropic factors.

- "Conceptual study of the use of heat produced by concentrated solar plants to exploit residual organic matrices through pyrolytic processes and co-production of electricity" (LA1.19) - The best coupling strategies between pyrolytic process and concentrated solar plant will be formulated, by analysing the electricity co-production scenario also, and feasibility analyses and detail process schemes will be elaborated to be used in future demonstration projects and pilot plants.

Finally, to monitor the progress of the Project and maximize its impact, the Project management activities, as well as the communication and dissemination of results, will be carefully implemented (LA1.20, LA1.21).

## 2.3 TRL progetto

TRL iniziale: 2

TRL finale: 7

Per il Progetto 1.9 "Solare Termodinamico" non è possibile definire un livello di maturità tecnologica (TRL) complessivo in ragione delle specificità e della eterogeneità delle linee di ricerca (comprese nelle 3 tematiche scientifico-applicative in cui è organizzato il Progetto) che presentano diversi TRL iniziali e finali.

Di seguito la situazione per ogni linea di ricerca del Progetto, inserita nell'ambito della tematica di riferimento.

Tematica "sistemi di accumulo termico per impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER e per la fornitura di energia su base stagionale" – Per la linea di ricerca sui sistemi di accumulo termocline a sali fusi, per l'ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER, si realizzerà il prototipo di un nuovo sistema di accumulo ibridizzato, up-grade del sistema sviluppato nel precedente triennio e che, come questo, sarà testato in ambiente operativo (TRL 7). Per la linea sui sistemi di riscaldamento elettrico a microonde dei sali fusi, la tecnologia a microonde, sperimentata nel precedente triennio mediante un dispositivo "proof of concept" (TRL 3), sarà applicata e convalidata in un prototipo sperimentale di accumulo termico su scala di laboratorio finalizzato all'ottimizzazione delle condizioni operative (TRL 4). Per la linea sui sistemi di accumulo termico stagionali a zeoliti, la tecnologia dell'accumulo termo-chimico a zeoliti, precedentemente studiata per lo stoccaggio di calore fino a 250 °C (TRL 4), sarà applicata in un nuovo prototipo di sistema a zeoliti con l'obiettivo di perseguire un accumulo termico stagionale per l'alimentazione di utenze distribuite (TRL 4-5).

Tematica "materiali e dispositivi per il monitoraggio degli impianti CSP/CST e l'innovazione dei processi O&M" – Per la linea di ricerca sui sensori di sporramento/failure degli specchi solari, i materiali studiati nel precedente triennio per la realizzazione di superfici riflettenti autopulenti (TRL 5-6) verranno ulteriormente funzionalizzati mediante l'integrazione di sensori di sporramento/failure sviluppati a partire da quelli piezoelettrici del precedente triennio (TRL 3) per l'ottenimento di specchi sensorizzati (TRL 5-6) prospetticamente idonei per la digitalizzazione del campo solare degli impianti CSP/CST; inoltre, sarà sviluppato un prototipo "proof of concept" di sensore ottico (TRL 3) per l'acquisizione di informazioni sul campo solare mediante tecniche UAS (Unmanned Aerial Systems). Per la linea sulla diagnosi a

ultrasuoni per la rilevazione di occlusioni solide nel piping di impianti CSP/CST a sali fusi, la tecnologia precedentemente elaborata solo a livello concettuale e di configurazione preliminare (progetto) di un dispositivo di rilevazione a ultrasuoni (TRL 2-3) verrà sperimentata e convalidata in un dispositivo prototipale realizzato su scala di laboratorio (TRL 4).

Tematica “integrazione degli impianti CSP/CST in sistemi di poligenerazione distribuita asserviti a utenze industriali e civili” – Per la linea di ricerca sui sistemi di cogenerazione distribuita, alimentati da impianti CSP/CST ibridizzati con PV e asserviti a utenze industriali e civili locali, l’ibridizzazione del CSP/CST con PV e la poligenerazione con cicli h24 verrà dimostrata mediante prototipi operanti in ambiente rilevante (TRL 6) presso il C.R. ENEA di Casaccia, utilizzando e valorizzando parte dell’infrastruttura sperimentale implementata nel precedente triennio. Proseguirà lo sviluppo del prototipo di un innovativo sistema micro-PTC realizzando e testando in ambiente rilevante/operativo (TRL 6-7) un suo up-grade, basato sullo studio progettuale del precedente triennio, che prevede l’implementazione di tubi ricevitori evacuati dotati di un innovativo coating solare fabbricato con processi di deposizione d’interesse industriale (TRL 7). Riguardo alle restanti linee di ricerca della terza tematica, per la natura teorica delle attività a esse associate, non è possibile attribuire uno specifico TRL iniziale e finale.

## 2.4 Inquadramento del progetto nello stato dell'arte

### a) Stato dell'arte nazionale e internazionale relativamente alle attività previste nel progetto

Il solare a concentrazione, termodinamico (Concentrated Solar Power, CSP) e termico (Concentrated Solar Thermal, CST), è una tecnologia che negli ultimi 10-15 anni ha conosciuto una notevole diffusione a livello mondiale.

Molteplici impianti CSP per la generazione di energia elettrica sono oggi operativi in tutto il mondo, con una potenza installata superiore ai 6,6 GWe (di cui 2,4 GWe in Europa) e ulteriori 1,5 GWe attualmente in costruzione. La tecnologia più diffusa è quella dei collettori lineari (fondamentalmente parabolici, PTC – Parabolic Trough Collector, e in subordine Fresnel, LFC – Linear Fresnel Collector), che utilizzano olio diatermico come fluido termovettore e accumulano termico a sali fusi fino a circa 380 °C. Se i primi impianti realizzati negli anni ‘80 negli Stati Uniti sono ancora operativi e tra il 2008 e il 2013 si è registrata una rapida crescita del CSP in Spagna, attualmente la diffusione della tecnologia sta interessando tutti i continenti (Spagna, USA, Cina, Marocco, Sudafrica, Emirati Arabi, Cile, Australia, ecc.). Gli impianti più moderni presentano sistemi di accumulo termico in grado di estendere la produzione di elettricità per oltre 15 ore, permettendo così di programmare la generazione elettrica anche sulle 24 ore. Negli anni tra il 2010 e il 2020, si è registrata una sensibile riduzione del LCOE (Levelized Cost of Electricity) del CSP, da 0,34 USD/kWh fino a un valore limite di 0,108 USD/kWh stimato per taluni specifici impianti di recente realizzazione [fonte: IRENA-2021, Renewable Power Generation Costs in 2020, International Renewable Energy Agency, ISBN 978-92-9260-348-9], con un rateo di riduzione dei costi simile a quella precedentemente osservata per il fotovoltaico (PV), nonostante una capacità installata del CSP che (a livello mondiale) è circa 200 volte inferiore rispetto al PV.

Anche gli impianti CST per la produzione di energia termica si stanno rapidamente diffondendo, soprattutto per la fornitura di calore di processo a medio-bassa temperatura all’industria (applicazioni SHIP, Solar Heat Industrial Processes). A titolo di esempio, a settembre 2023 è stato inaugurato presso lo stabilimento Heineken di Siviglia, in Spagna, l’impianto SHIP più grande d’Europa; l’impianto, di tipo PTC, ha una potenza di 30 MWth, è dotato di 8 serbatoi di accumulo termico ad acqua pressurizzata, produce calore fino a 210 °C ed è stato costruito in soli 12 mesi. Interessante è anche il caso canadese della Drake Landing Solar Community dove, grazie a un sovradimensionamento dell’impianto solare e dell’accumulo stagionale, il contributo del solare termico su base annuale sfiora addirittura il 100% del fabbisogno totale di calore.

A livello internazionale, le attività di Ricerca & Innovazione ritenute più strategiche ai fini del consolidamento della tecnologia sono indicate nell’“Updated (2023) CSP/CST Implementation Plan (IP) del SET Plan” e riguardano le aree tecnologiche degli impianti solari a concentrazione sia a collettori lineari che a ricevitore centrale, di affidabili ed economici fluidi termovettori e sistemi di accumulo termico ad alta temperatura, di turbomacchine sviluppate ad hoc per impianti CSP, di sistemi CST a media e alta temperatura per applicazioni SHIP, della produzione termochimica di “solar fuels” e idrogeno, nonché tutta una serie di problematiche tecnologiche trasversali (digitalizzazione degli impianti CSP, rivestimenti innovativi per specchi, affidabile integrazione tra CSP, PV e altre FER, promozione degli impianti CSP con accumulo termico per facilitare la penetrazione delle FER nel sistema elettrico).

In merito al posizionamento del nostro Paese, storicamente l’Italia è sempre stata all’avanguardia nello sviluppo di nuove tecnologie per lo sfruttamento dell’energia solare e, con riferimento alla tecnologia CSP, ENEA, sin dai primi anni 2000, ha introdotto e sviluppato un’innovativa tecnologia basata sull’utilizzo dei sali fusi come fluido termovettore e materiale per l’accumulo in sistemi a collettori lineari, conseguendo diversi vantaggi rispetto alla più convenzionale tecnologia dei collettori lineari con olio diatermico, ovvero l’incremento dell’efficienza della conversione termo-elettrica, la riduzione dei costi d’impianto e la diminuzione dell’impatto ambientale. Ad oggi, sono già stati realizzati impianti dimostrativi con tecnologia ENEA a sali fusi e collettori lineari parabolici a Priolo Gargallo (5 MWe, progetto Archimede) e in Egitto (1 MWe, progetto MATS). L’industria nazionale ha effettuato importanti forniture di tubi ricevitori solari, prodotti su licenza ENEA, per l’impianto a sali fusi e collettori lineari parabolici “Akesai Solar Thermal Power Plant”, costruito in Cina (fornitura ricevitori nel 2015 e 2016), e per l’impianto a olio diatermico e collettori lineari parabolici “ISCC Duba 1”, costruito in Arabia Saudita (fornitura ricevitori nel 2017). In Sicilia, in particolare in provincia di Trapani, una società di EPC italiana si è occupata della realizzazione

di due impianti commerciali basati su tecnologia Fresnel a sali fusi: il primo impianto ("Partanna") di potenza pari a 4,26 MWe e con accumulo termico di circa 15 ore è attualmente in esercizio, mentre il secondo ("Stromboli") di analoga potenza e accumulo termico, è in fase avanzata di costruzione. Sempre nell'ambito degli impianti CSP per la generazione di energia elettrica, è in fase di costruzione un altro impianto CSP da 1 MWe nella provincia di Enna (Dittaino) con tecnologia a olio diatermico e collettori solari Fresnel realizzati da una società italiana, mentre è operativo a Rende (CS) un impianto da 1 MWe di CSP ibridizzato con un sistema alimentato a biomassa. Con riferimento agli impianti CST per la fornitura di calore di processo all'industria, a titolo di esempio, è possibile citare l'impianto CST di recente messo in funzione presso lo stabilimento della Birra Peroni di Bari, che è dotato di un campo solare di circa 600 m<sup>2</sup> con collettori lineari prodotti da una società svedese e temperatura massima del vapore generato di 160 °C, e l'impianto FMI S.r.l. (Forlì), che utilizza un sistema solare termico a concentrazione per alimentare un'area industriale di circa 20000 m<sup>2</sup>. Infine, l'impianto di PULA (CA) (in corso di realizzazione) prevede un sistema CST ibridizzato con PV per l'alimentazione di un plesso scolastico.

Si tratta di realtà industriali nazionali e, in molti casi, di competenze tutte italiane, che hanno investito nel solare a concentrazione (CSP e CST) e che crescono intorno a una tecnologia innovativa per un mercato emergente. I suddetti impianti, da considerarsi tra i primi nel loro genere, presentano infatti numerose tecnologie e componenti sviluppati in Italia e pronti per la diffusione sul mercato, sia in ambito nazionale sia per l'export in altri Paesi.

A supporto dello sviluppo tecnico-scientifico e commerciale della tecnologia CSP/CST nel Paese, sfruttando le competenze di ENEA e di selezionati gruppi di ricerca di Università italiane (con specifiche conoscenze nel settore e/o che hanno collaborato con l'affidatario ENEA, in qualità di co-beneficiari, nel Progetto 1.9 "Solare Termodinamico" nei due precedenti trienni della RdS), il presente Progetto 1.9 "Solare Termodinamico" del PTR 2025-2027 della RdS si propone di avviare e condurre nuove attività di ricerca, parte delle quali si innestano sui risultati conseguiti e sui prodotti sviluppati nel precedente triennio della RdS, con l'obiettivo specifico di rendere disponibili materiali, componenti, dispositivi, sistemi, soluzioni tecniche e metodologie avanzate per (i) l'efficace ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER, (ii) funzionali alla digitalizzazione degli impianti CSP/CST e (iii) per la loro integrazione con utenze industriali e/o civili e con le reti energetiche, sia in applicazioni di generazione e co-generazione centralizzata che distribuita. Il conseguimento di tale obiettivo specifico consentirebbe di incrementare la dispacciabilità dell'energia elettrica/termica prodotta dalla fonte solare, di aumentare la versatilità di utilizzo degli impianti CSP/CST e di ridurre il costo di generazione dell'energia elettrica/termica mediante il miglioramento delle performance e la riduzione dei costi O&M.

Di seguito si riporta un quadro dello stato dell'arte, nazionale e internazionale, specifico per ogni linea di ricerca del Progetto, inserito nell'ambito della tematica scientifico-applicativa di riferimento.

Tematica "sistemi di accumulo termico per impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER e per la fornitura di energia su base stagionale":

- Con riferimento alla linea di ricerca sulla "comparazione sperimentale tra sistemi di accumulo termico, di tipo termocline a sali fusi, per l'ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER", si evidenzia che nell'ultimo decennio si è assistito non solo a un profondo cambiamento nel mix energetico, con l'elettricità che ha assunto un ruolo sempre più centrale, ma anche a un notevole aumento del contributo dell'energia elettrica da fonti rinnovabili, che si prevede raggiungerà il 50% entro il 2030. Questo panorama in evoluzione richiede di affrontare le sfide poste dall'integrazione di quantità significative di energia rinnovabile variabile, che ha un impatto fondamentale sulle dinamiche operative e sulla governance del sistema energetico. La risposta individuata a livello europeo e nazionale (PNIEC) per rispondere a queste mutate esigenze è quella promuovere sinergie virtuose tra il settore elettrico e comparti diversi ("sector integration") come il riscaldamento, il raffreddamento, la mobilità o i processi industriali, comunità urbane, il tutto con l'obiettivo di favorire la massiccia penetrazione delle rinnovabili nel mix energetico. Tuttavia, integrare diverse tecnologie richiede soluzioni avanzate per garantire l'interoperabilità e la gestione efficiente dei flussi energetici. Questo implica lo sviluppo di sistemi tecnologici che possano coordinare l'uso delle diverse fonti di energia in modo ottimale. In questo contesto lo sviluppo di sistemi CSP/CST ibridizzati con altre fonti rinnovabili non programmabili rappresenta un tassello utile per attuare il "sector coupling". In questo campo, a parte alcuni esempi industriali (Danimarca) dove le produzioni solare termica ed eolica sono accoppiate in modo ottimale attraverso un accumulo termico per far fronte alle esigenze e alle disponibilità stagionali delle due FER, in generale non esistono casi applicativi. In quest'ambito, si evidenzia come i sistemi di accumulo termico a sali fusi, impiegati nelle centrali solari a concentrazione, sono stati proposti negli ultimi anni come versatili hub energetici, consentendo di accettare e immagazzinare gli eccessi di elettricità/calore prodotti da fonti rinnovabili, di alimentare "on demand" sia utenze termiche che elettriche e di fornire una maggiore flessibilità alla gestione della rete elettrica (bilanciare la rete e ridurre i picchi di domanda) sia livello centralizzato che decentralizzato. Tali sistemi di accumulo termico sono attualmente studiati come alternativa alle batterie, avendo capacità più elevate, costi minori e basandosi su materiali non critici, a fronte dello svantaggio di una conversione elettro-termica che, se realizzata attraverso un fluido di scambio intermedio (e, più in generale, mediante meccanismi di scambio termico superficiali), risulta limitata con riduzione della massima potenza trasferibile.

- Per la linea di ricerca sui "sistemi di riscaldamento elettrico a microonde dei sali fusi per l'ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER", si evidenzia che, sebbene la tecnologia delle microonde sia ormai matura in diversi settori industriali, a partire da quello alimentare, l'applicazione delle microonde per il riscaldamento elettrico dei sali fusi nel contesto dei sistemi di accumulo di energia termica è una tecnologia emergente. Rispetto all'effetto Joule, le microonde consentono di ottenere un riscaldamento volumetrico, evitando l'insorgenza di punti caldi presso la superficie di scambio termico. Nel 2023 il CIEMAT ha pubblicato uno studio sperimentale volto alla determinazione delle proprietà dielettriche dei sali fusi binari per temperature medio-basse (< 360 °C). Recentemente, il

CIEMAT ha inoltre presentato alla conferenza “SolarPACES 2023” un lavoro sperimentale che ha dimostrato la fattibilità e le potenzialità del riscaldamento dei sali fusi mediante microonde. In particolare, piccoli contenitori ceramici (50 – 300 ml) riempiti con sali fusi sono stati inseriti all'interno di un forno a microonde misurando, mediante una termocamera, la temperatura dei sali durante un transitorio di riscaldamento. Tuttavia, l'accoppiamento diretto della tecnologia delle microonde con sistemi di accumulo termico a sali fusi non è stato ancora realizzato e testato. Per tale motivo, con lo scopo di applicare direttamente il riscaldamento a microonde in serbatoi di accumulo a sali fusi, nell'ambito del precedente triennio della RdS, ENEA ha sviluppato un primo dispositivo sperimentale, su scala di laboratorio, per il riscaldamento con microonde di sali fusi (6 litri) all'interno di un serbatoio metallico.

- Per la linea di ricerca sui “sistemi di accumulo termico stagionali, di tipo termo-chimico a zeoliti, alimentabili da CST”, si evidenzia che il ricorso a sistemi di accumulo innovativi, basati su materiali adsorbenti (quali le zeoliti) in grado di scambiare calore termo-chimico durante le fasi di adsorbimento/desorbimento di vapore in condizioni di basso vuoto, rappresenta una valida e interessante alternativa (per efficienza e densità di accumulo) ai sistemi tradizionali a calore sensibile. Tali sistemi sono ancora in fase di sviluppo ed allo stato attuale esistono prevalentemente a livello di prototipi da laboratorio. In questo contesto, tale tipologia di accumulo può rappresentare un'interessante prospettiva nel panorama delle applicazioni CST a media temperatura per la fornitura di energia termica su base stagionale, potendosi stoccare anche per lunghi periodi l'energia termo-chimica immagazzinata durante il processo di desorbimento. Tematica “materiali e dispositivi per il monitoraggio degli impianti CSP/CST e l'innovazione dei processi O&M”:

- La linea di ricerca sui “sensori di sporco/failure degli specchi per la digitalizzazione del campo solare degli impianti CSP/CST” risponde al notevole interesse verso la gestione da remoto degli impianti CSP/CST per favorire la transizione digitale e ne costituisce un primo essenziale passaggio: sviluppare sensori e trasduttori che rendano “parlanti” gli specchi solari, consentendone l'interfaccia con tecnologie ICT. La possibilità di acquisire da remoto dati sull'operatività degli specchi solari di impianti di varia taglia e geometria, gestire in maniera mirata la manutenzione ordinaria, ridurre i costi delle operazioni di lavaggio per ripristinare la riflettanza speculare, presuppone il posizionamento di idonea sensoristica in punti strategici sia dei singoli specchi che dell'intero campo solare. Non esistono ancora soluzioni commerciali adatte allo scopo in quanto ciascun impianto ha una gestione della manutenzione fondata sull'ispezione visiva (e/o coadiuvata da riflettometri portatili) degli operatori preposti, oppure su output provenienti da stazioni meteorologiche posizionate nel sito e su interventi di lavaggio programmati in maniera talvolta indipendente dalla necessità oggettiva, con notevole dispendio di risorse. Definire materiali sensibili idonei a monitorare le performance degli specchi solari senza inficiarne la riflettanza, metodi di utilizzo (sensing distribuito, trasduzione del segnale, interfaccia con ICT) e prassi che possano diventare lo standard gestionale di un campo solare è altamente auspicabile. Nella letteratura scientifica gli unici studi sull'integrazione di elementi sensibili in rivestimenti autopulenti di specchi solari sono stati sviluppati nell'ambito del precedente triennio della RdS, in una linea di ricerca sulle superfici riflettenti autopulenti predisposte all'integrazione nello strato idrofobico di ulteriori elementi idonei a garantire prestazioni autodiagnostiche del livello di funzionamento. Non sono note prassi di gestione da remoto di campi solari attraverso feedback ICT provenienti da sensori integrati negli specchi, mentre si segnala l'utilizzo di una rete neurale CNN avente come input immagini RGB scattate in situ sul singolo specchio [A. El Ydrissi, H. Ghennioui, E. G. Bennouna, A. Alae, M. Abraim, I. Taabane, A. Farid, *Dust InSMS: Intelligent soiling measurement system for dust detection on solar mirrors using computer vision methods*, Expert Systems with Applications, Vol. 211, 2023, 118646, ISSN 0957-4174]. Notevole traguardo verso una reale smartizzazione del campo solare può provenire dallo sviluppo di aree interrogabili di medie dimensioni localizzate sui singoli specchi (sensing distribuito) e in grado di “comunicare” attraverso tecnologie ICT.

- Per la linea di ricerca sulla “diagnosi a ultrasuoni per la rilevazione di occlusioni solide nel piping di impianti CSP/CST utilizzando miscele di sali fusi come fluido termovettore”, l'analisi dello stato dell'arte ha rivelato che, sebbene questo campo specifico susciti notevole interesse nell'ambito della manutenzione degli impianti CSP/CST a sali fusi, non si identificano soluzioni preesistenti comparabili alla tecnologia proposta. Il dispositivo di diagnosi a ultrasuoni che si intende sviluppare nell'ambito del Progetto rappresenterà quindi un “first-of-kind”, concepito e testato in ambiente di laboratorio per monitorare e diagnosticare l'operatività degli impianti CSP/CST a sali fusi, in particolare del tipo a collettori lineari PTC e LFC. Questa innovazione avrà lo scopo di identificare la presenza di occlusioni causate dalla solidificazione della miscela di sali, fenomeno spesso dovuto al loro incontrollato raffreddamento all'interno di determinate sezioni degli impianti CSP/CST. Tale problematica, comune in questi sistemi, può portare all'interruzione delle operazioni per prolungati fermi-impianto e, di conseguenza, a significative perdite di redditività. Come ha dimostrato lo studio condotto nell'ambito del precedente triennio della RdS, i dispositivi a ultrasuoni, ampiamente validati nell'ambito della diagnostica medica, costituiscono un eccellente punto di partenza per lo sviluppo di tecniche analoghe nel settore CSP/CST finalizzate a identificare e prevenire le occlusioni nelle tubature, nei ricevitori, nelle valvole e nelle sezioni più vulnerabili a tali problematiche, sia durante le fasi operative degli impianti che in fase di progettazione preliminare di questi componenti/sezioni critiche.

Tematica “integrazione degli impianti CSP/CST in sistemi di poligenerazione distribuita asserviti a utenze industriali e civili”:

- Con riferimento alla linea di ricerca sui “sistemi di cogenerazione distribuita, alimentati da impianti CSP/CST ibridizzati con PV, asserviti a utenze industriali e civili locali”, è importante evidenziare che il mercato del calore a bassa e media temperatura è stimato, a livello mondiale, in 12222 TWh, di cui il 58% per gli edifici e circa il 42% per i processi industriali (chimici, alimentari e bevande, macchinari, tessili, elaborazione testi), con 2700 TWh per le applicazioni a bassa temperatura e 2400 TWh per quelle a media temperatura. Il pacchetto di politiche “Fit for 55” prevede un aumento della quota di FER nel settore H&C dello 0,8% all'anno fino al 2026 e dell'1,1% successivamente, mentre per il teleriscaldamento e il teleraffreddamento (DHC), la quota di FER deve essere pari allo 0,8%

all'anno. In quest'ambito, sono disponibili in commercio una serie di tecnologie per il riscaldamento e il raffreddamento solare non concentrato per applicazioni a bassa temperatura (entro i 150 °C). Il solare termico a concentrazione (CST), invece, si rivolge principalmente alla fornitura di energia termica nell'intervallo 150-400 °C per l'industria e per le applicazioni di teleriscaldamento, spesso come parte di una soluzione integrata con altre fonti di calore al fine di garantire la continuità della fornitura. In merito al teleriscaldamento solare (Solar District Heating – SDH), attualmente sono in costruzione grandi impianti in diversi Paesi dell'UE (tra cui Spagna, Paesi Bassi, Danimarca); queste iniziative testimoniano la crescente adozione della tecnologia solare termica, segnando passi importanti verso la decarbonizzazione del riscaldamento in Europa. I sistemi di teleriscaldamento solare su larga scala hanno acquisito importanza negli ultimi anni (soprattutto nei paesi nordici), a causa dei crescenti investimenti verso gli stabilimenti industriali e commerciali. Questi sistemi sono di solito implementati in sistemi di riscaldamento distrettuali e a blocchi, tra cui edifici multifamiliari, hotel, industrie, impianti sportivi e centri dati. Inoltre, questi sistemi hanno costi specifici e alternativi inferiori rispetto ai sistemi di piccole dimensioni. Il rapido cambiamento della temperatura superficiale in tutte le regioni e le normative favorevoli alle tecnologie di riscaldamento sostenibile presenti nei singoli Paesi hanno favorito la realizzazione di un crescente numero di casi applicativi. In Italia, eccetto che per l'impianto della FMI S.r.l. di Forlì operativo dal 2015, complice una lunga stagione di costi bassi e stabili del metano e una normativa di incentivazione penalizzante, questi sistemi non hanno avuto una larga diffusione; tuttavia le recenti crisi energetiche con forti incrementi, anche se per brevi periodi temporali, del prezzo del gas e la necessità delle industrie di medie dimensioni di decarbonizzare il processo produttivo per ridurre il "carbon footprint" dei loro prodotti (come richiesto sia dalle normative in fase di attuazione che dai loro clienti) ha ridestato l'attenzione per questo tipo di tecnologie, sebbene la filiera nazionale sia ancora in una fase embrionale. Con riferimento alle applicazioni distribuite del CSP/CST, lo sviluppo di sistemi mini-CSP/CST e, soprattutto, micro-CSP/CST apre nuove opportunità per l'impiego della tecnologia del solare a concentrazione in sistemi energetici con utenze sia termiche che elettriche; infatti, rispetto ai sistemi solari termici tradizionali (già ben integrabili in strutture edilizie), i micro-CSP/CST riescono a raggiungere livelli termici più elevati, utili per consentire una cogenerazione di energia termica ed elettrica (attraverso, ad esempio, sistemi ORC), possono essere impiegati in contesti fortemente antropizzati e anche in aree con una DNI < 1900 kWh/anno m<sup>2</sup>. In merito alla tecnologia degli impianti micro-CSP/CST con collettori di tipo micro-PTC, il presente Progetto si inserisce in un contesto caratterizzato da un limitato coinvolgimento da parte della comunità scientifica e dei diversi produttori di componentistica per impianti CSP/CST, in cui le soluzioni proposte nel Progetto sono da considerare all'avanguardia. In particolare, si evidenzia che a causa delle ridotte dimensioni dei sistemi micro-PTC, a tutt'oggi, non è stato possibile utilizzare quanto sviluppato per i tubi ricevitori con tubo di acciaio DN 70 (tipici dei grandi PTC) e questo ha richiesto di percorrere strade completamente diverse adattando in genere, per la fabbricazione del coating solare, i sistemi di sputtering dei tubi sottovuoto per collettori piani, tecnologia quasi esclusivamente residente in Cina.

- Per la linea di ricerca sull'"analisi delle potenzialità degli impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER per la decarbonizzazione dell'industria", si evidenzia che, allo stato attuale, il settore industriale è responsabile per circa il 20% delle emissioni di gas serra e il 60% di tali emissioni sono causate dalla produzione di potenza termica. Infatti, ad oggi, la potenza termica richiesta dalle industrie viene per lo più generata da caldaie o motori/cicli cogenerativi alimentati a combustibili fossili (es. gas naturale). Per raggiungere gli obiettivi di decarbonizzazione imposti dai dispositivi comunitari e nazionali è necessario sviluppare sistemi energetici a fonte rinnovabile capaci di produrre potenza termica alle temperature richieste dall'industria. Gran parte (> 40%) del calore richiesto nell'industria è nel range 100 – 300 °C, sottoforma di vapore o olio diatermico. Esempi sono le industrie chimiche, farmaceutiche, agroalimentari e le cartiere. Per queste industrie i sistemi CST dotati di sistemi di accumulo possono essere un'ottima alternativa all'utilizzo di caldaie, specialmente nei Paesi ad alto irraggiamento diretto. In quest'ambito, anche con riferimento ai precedenti trienni della Ricerca di Sistema, esistono studi di letteratura che individuano e descrivono le richieste di calore per diverse industrie e discutono della possibile applicazione delle tecnologie del solare a concentrazione per la copertura del carico termico di tali industrie. Inoltre, esistono diversi studi (tra cui quelli dei precedenti PTR effettuati dal PolIMI in collaborazione con ENEA) circa l'ottimizzazione del progetto e della gestione di sistemi CSP ibridizzati con altre tecnologie FER per la produzione di potenza elettrica dispacciabile. Tuttavia, ad oggi, non vi sono ancora studi inerenti all'ottimizzazione di sistemi CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER per la cogenerazione di potenza elettrica e termica per la decarbonizzazione dell'industria. In particolare, sebbene tali sistemi si presentino interessanti da punto di vista della potenziale riduzione dei costi e aumento della dispacciabilità (possibilità di servire la domanda termica e/o elettrica per un numero maggiore di ore annue), manca sia un'analisi estesa che valuti le prestazioni tecnico-economiche-ambientali di questi sistemi CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER (in primis PV) tramite resistenze elettriche e/o pompe di calore ad alta temperatura, sia uno studio sistematico sul costo di tali impianti al variare del grado di decarbonizzazione richiesto.

- Per la linea di ricerca sullo "studio concettuale dell'utilizzazione di calore solare da impianti a concentrazione per la valorizzazione di matrici organiche residuali mediante processi pirolitici e coproduzione di elettricità", si evidenzia che il processo di pirolisi termochimica è ampiamente studiato in assenza o in presenza di un solvente utilizzando un'ampia gamma di materie prime di partenza adatte a produrre combustibili liquidi e/o gassosi. Le matrici organiche più studiate sono sia di origine biogenica (come micro e macroalghe, fanghi di depurazione, frazione organica differenziata dei rifiuti solidi urbani o matrici lignocellulosiche), sia di origine non biogenica (come plastiche residuali). Indipendentemente dalle configurazioni dei reattori o dai tipi di catalizzatori, sia la pirolisi che la solvo-pirolisi offrono la possibilità di trasferire l'energia chimica contenuta nella matrice organica solida principalmente in un vettore energetico liquido, comunemente chiamato bio-olio. Il Global Waste Management Outlook 2024

[<https://www.unep.org/resources/global-waste-management-outlook-2024>] ha riportato che nel 2024 solo il 13% della produzione

mondiale totale di rifiuti viene valorizzata energeticamente. Uno dei principali svantaggi dei processi pirolitici è l'elevata entalpia richiesta per raggiungere una temperatura di reazione, che va da 300 a 600 °C, all'interno dei pirolizzatori [A. Al-Rumaihi, M. Shahbaz, G. McKay, H. Mackey, T. Al-Ansari, A review of pyrolysis technologies and feedstock: A blending approach for plastic and biomass towards optimum biochar yield, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167, 2022, 112715, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112715>]. L'integrazione del calore tra i flussi in ingresso e in uscita dal pirolizzatore è essenziale per rendere il processo di valorizzazioni di matrici residuali un produttore netto di energia [C. Hognon, F. Delrue, G. Boissonnet, Energetic and economic evaluation of *Chlamydomonas reinhardtii* hydrothermal liquefaction and pyrolysis through thermochemical models, *Energy* 2015, 93, 31–40, <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.09.021>]. Nei processi pirolitici convenzionali è sempre necessaria una fonte di energia esterna, spesso ottenuta utilizzando una frazione del bio-olio prodotto come combustibile. Tuttavia, questa strategia riduce la produttività netta di bio-olio e l'efficienza complessiva del processo. Sulla base di queste considerazioni si deduce che la sostenibilità dei processi pirolitici per la valorizzazione di matrici organiche residuali sarebbe migliorata se l'energia necessaria per eseguire il processo potesse essere ottenuta dal calore solare utilizzando una configurazione di impianto economica e accessibile. Diversi studi recenti hanno indagato l'accoppiamento di differenti tecnologie pirolitiche e solvo-pirolitiche con tecnologie che sfruttano la radiazione solare con interessanti risultati. Di particolare rilevanza è lo studio di Khudayar et al. [D. Khudayar, M. Mehrpooya, S. M. A. Moosavian, *Arabian Journal for Science and Engineering* 2024, 49, 8341–8362, <https://doi.org/10.1007/s13369-024-08848-3>] incentrato sull'analisi di un sistema integrato di pirolisi di pioppo con un collettore solare eliostatico ed un sistema di accumulo termo-chimico, che ha dimostrato che è possibile sostituire il reattore a combustione diretta e le altre unità convenzionalmente utilizzate per riscaldarlo riducendo di circa l'88% la richiesta di energia del pirolizzatore. È stata eseguita un'analisi concettuale [A. Giaconia, G. Caputo, A. Ienna, D. Mazzei, B. Schiavo, O. Scialdone, A. Galia, *Applied Energy* 208, 2017, 1139–1149, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.038>] dell'accoppiamento di un particolare tipo di solvo-pirolisi, la liquefazione idrotermica, con un impianto solare a concentrazione che fa uso di una miscela di sali fusi come fluido termovettore. Tale studio ha dimostrato che la sostenibilità economica dell'intero processo dipende essenzialmente dal costo della materia prima utilizzata. In particolare, il prezzo minimo di vendita del bio-olio prodotto si riduce di circa il 40% cambiando la carica da microalghe a una matrice organica residuale.

#### b) Attività svolte nel triennio precedente

Le attività svolte nell'ambito del Progetto 1.9 "Solare Termodinamico" del precedente PTR 2022-2024 della RdS erano organizzate in 3 tematiche scientifico-applicative.

Nell'ambito della prima tematica, inerente a "materiali e componenti avanzati per impianti CSP/CST", sono stati sviluppati e realizzati in forma di prototipo, mediante processi di deposizione di tipo sputtering d'interesse industriale, (i) un coating a elevate prestazioni fototermiche (assorbanza solare pari a 96.13% ed emissività termica a 350 °C pari a 7.12%) per tubi ricevitori di impianti micro-PTC operanti a media temperatura ( $\leq 350$  °C) e (ii) un coating a prestazioni fototermiche incrementate (assorbanza solare pari a 95.1% ed emissività termica a 550 °C pari a 9.5%) rispetto allo stato dell'arte per tubi ricevitori di impianti CSP/CST a collettori lineari (PTC o LFC) operanti ad alta temperatura ( $\leq 550$  °C); entrambi i coating risultavano stabili nelle condizioni operative previste ( $T \leq 350$  °C e  $T \leq 550$  °C, rispettivamente, e  $p < 10^{-4}$  mbar) per una vita utile del componente  $\geq 25$  anni. Nell'ambito della prima tematica è stata, inoltre, effettuata un'analisi del potenziale applicativo della tecnologia micro-CSP/CST basata su sistemi di tipo micro-PTC per la generazione distribuita di calore ed elettricità in contesti, civili e industriali, fortemente antropizzati del territorio italiano. Nella specifica applicazione civile, sistemi ad assorbimento permettendo, si può facilmente ottenere anche energia frigorifera; gli studi condotti hanno infatti evidenziato una carenza di sistemi ad assorbimento commerciali efficienti e/o maturi per lo scopo specifico. Il prototipo di un innovativo sistema modulare micro-PTC, sviluppato e realizzato dal co-beneficiario UniFI in attività di ricerca precedenti a quelle di Progetto, è stato caratterizzato mediante prove condotte presso la stazione testing dell'impianto sperimentale Fresnel "ENEA-SHIP" del C.R. ENEA di Casaccia, individuandone criticità e soluzioni migliorative, da cui la necessità di uno studio progettuale di up-grade del prototipo di micro-PTC finalizzato a: (a) incrementare la temperatura operativa del sistema fino a valori dell'ordine di 350 °C (per impiego cogenerativo), (b) facilitarne l'integrazione in strutture edilizie e (c) avviare il processo di industrializzazione. Rimanendo ancora nell'ambito della prima tematica, al fine di razionalizzare gli interventi di pulizia e ridurre i costi O&M del campo solare, sono stati ottimizzati metodi di fabbricazione (economici e scalabili) di rivestimenti autopulenti su specchi solari di dimensioni reali. Sono stati realizzati e caratterizzati in campo, sull'impianto Fresnel "ENEA-SHIP", due prototipi di superficie riflettente autopulente, uno fabbricato con tecnica spray HVLP e l'altro depositato per sputtering, idrofobici (è stato incrementato l'angolo di contatto statico, WCA, da valori di 40-50° del vetro degli specchi tal quali a valori  $> 90^\circ$  dei prototipi di specchi dotati di rivestimento autopulente) e trasparenti (diminuzione della riflettanza "solare" dei prototipi rispetto a quella degli specchi non rivestiti entro l'8% in tutto il range solare). È stato inoltre sviluppato un prototipo di sensore di sporco/failure, di scala laboratoriale, per la diagnosi in remoto dell'operatività del campo solare costituito da un polipiroide del nitrato di alluminio avente elevato coefficiente piezoelettrico, potenzialmente modificabile dall'effetto gravimetrico della polvere. La scelta di detto materiale ha risposto all'esigenza di non modificare sostanzialmente le linee produttive degli specchi solari già esistenti in commercio, che hanno come ultimo strato l'ossido di alluminio amfifobico, sostituibile con un nitrato di alluminio trasparente e idrofobico (per ottemperare alla funzione di autopulenza) e potenziato in piccole aree da fasi piezoelettriche dello stesso materiale. Infine, sempre nell'ambito della prima tematica, mediante attività di simulazione numerica e sperimentazione in campo, su facility di test del C.R. ENEA di Trisaia appositamente implementate, di innovativi sistemi di accumulo termo-chimico a zeoliti operanti fino a T di 250 °C, sono

stati valutati (i) il potenziale di tali sistemi, abbinati a impianti solari a concentrazione, per applicazioni termiche distribuite di piccola taglia (climatizzazione ambientale e produzione di calore di processo per usi industriali) e (ii) le prestazioni di carica/scarica del calore durante le fasi di desorbimento/adsorbimento del vapore.

Nell'ambito della seconda tematica, inerente all'“ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie energetiche rinnovabili”, è stato progettato e realizzato un prototipo di sistema di accumulo termocline ibridizzato, alimentabile da un campo solare a concentrazione e da una caldaia elettrica collegata a un impianto PV. Il prototipo è costituito da un serbatoio, di altezza pari a 2.5 m e diametro pari 1.3 m, contenente il mezzo di accumulo costituito da una miscela di sali ternari; il sistema è dotato di 3 scambiatori elicoidali a fascio tubiero (2 di carica e 1 di scarica), immersi nei sali fusi, al cui interno circola olio diatermico; le prestazioni nominali del prototipo di sistema di accumulo sono: energia immagazzinata di 200 kWh, potenza di scambio in fase di carica per ogni singolo scambiatore di 17.8 kW e potenza in fase di scarica di 18.5 kW. La sperimentazione condotta da ENEA sul dimostratore tecnologico costituito dall'impianto Fresnel “ENEA-SHIP” con asservito il prototipo del sistema di accumulo termocline ibridizzato, supportata da simulazione del prototipo mediante un modello numerico sviluppato ad hoc, ha consentito di valutare le prestazioni termiche del prototipo e definire procedure operative di gestione dell'impianto solare a concentrazione ibridizzato ottimizzate per la produzione di calore per processi industriali. È stato effettuato un confronto, mediante analisi numerica, delle prestazioni del prototipo con quelle di un ulteriore innovativo sistema di accumulo termocline ibridizzato dotato di resistenze elettriche (alimentabili da PV) immerse nei sali fusi in luogo dello scambiatore di carica in cui circola olio diatermico riscaldato dalla caldaia elettrica. Sempre nell'ambito della seconda tematica, è stata condotta un'analisi su sistemi innovativi di riscaldamento elettrico dei sali fusi a induzione e a microonde, alimentabili da PV o da altre tecnologie FER “elettriche”, potenzialmente più efficienti rispetto al riscaldamento Joule con resistenze elettriche convenzionali immerse nei sali fusi. Tra le 3 tecnologie di riscaldamento prese in esame, la tecnologia a microonde è risultata quella più promettente in termini di (i) prestazioni (elevata potenza trasferibile ai sali indipendentemente dalla loro temperatura, efficienza e fase di carica veloce), (ii) fattibilità tecnologica con possibilità di validazione in laboratorio e (iii) potenziale scalabilità per applicazione in sistemi di accumulo termico di impianti CSP/CST di dimensioni reali. Anche con il supporto dell'analisi numerica condotta mediante un modello sviluppato ad hoc, è stato progettato e realizzato un dispositivo (su scala di laboratorio) per la sperimentazione del riscaldamento a microonde dei sali fusi che è stato impiegato per la caratterizzazione delle prestazioni termiche del concept proposto. Il dispositivo sperimentale è dotato di un serbatoio dei sali fusi con diametro di circa 280 mm, altezza di 500 mm e volume di sali fusi di circa 6 litri; la potenza massima del generatore di microonde è di 3 kW e la densità di potenza assorbita dai sali fusi è, in condizioni operative ottimali, maggiore di 100 W/kg. Il potenziale applicativo del riscaldamento elettrico a microonde dei sali fusi è stato valutato, mediante simulazione numerica, implementando tale nuova tecnologia in sistemi di accumulo termico ad alta temperatura (fino 550 °C) di dimensioni reali alimentabili da calore e da elettricità prodotti, rispettivamente, da CSP/CST e PV. Infine, nell'ambito della seconda tematica, sono stati sviluppati modelli numerici e una metodologia innovativa per la simulazione e l'ottimizzazione di design e operation di impianti ibridizzati tra CSP, PV ed Eolico, ed è stata effettuata un'analisi tecnico-economica di impianti ibridi CSP/PV/Eolici ottimizzati (con particolare riferimento a quelli di scala medio-piccola operanti sul Mercato del Giorno Prima, MGP, e sul Mercato dei Servizi di Dispacciamento, MSD). Le potenzialità di tali impianti sono state valutate sia con riferimento al mercato attuale, sia con riferimento ad un contesto con elevata penetrazione di rinnovabili (scenari 2030 e 2040).

Nell'ambito della terza tematica, inerente a “soluzioni tecniche e procedure operative per il settore industriale del CSP/CST”, mediante analisi teoriche e simulazioni numeriche, sono state valutate e superate le criticità connesse all'impiego delle tecnologie a ultrasuoni per sistemi di rilevazione di occlusioni solide all'interno del piping di impianti solari a concentrazione utilizzando miscele di sali fusi come fluido termovettore. È stata resa disponibile la configurazione preliminare (progetto di massima) ed è stato valutato il costo (stimato in circa 50-60 k€) di un prototipo di dispositivo di diagnosi a ultrasuoni per l'applicazione in oggetto. Sempre nell'ambito della terza tematica, sono state selezionate due miscele di sali fusi bassofondenti, (i) la miscela quaternaria Na/K/Ca/Li//NO<sub>3</sub> (11/51/25/13 %p) per applicazioni a media temperatura (tra 150 e 350 °C) e (ii) la ternaria Na/K/Li//NO<sub>3</sub> (23/57/20 %p) per applicazioni ad alta temperatura (tra 250 e 550 °C); inoltre, sono stati selezionati (i) l'acciaio al C ASTM A516 Gr. 70 e (ii) gli acciai austenitici AISI 304 e 347H come potenzialmente compatibili, rispettivamente, con le suddette miscele (i) quaternaria e (ii) ternaria. La campagna sperimentale condotta sul circuito “MoSE” (Molten Salt Experiments) del C.R. ENEA di Casaccia, opportunamente modificato e caricato con le due miscele di sali fusi bassofondenti a contatto con provini degli acciai selezionati, ha consentito di definire le procedure per la gestione operativa degli impianti CSP/CST a sali fusi di scala commerciale. Sulla base dei risultati delle analisi metallografiche (SEM/EDS/XRD) e dell'applicazione di modelli cinetici del meccanismo di corrosione sui provini di acciaio sottoposti ai test di corrosione dinamica nel circuito “MoSE” in condizioni simili a quelle reali di esercizio, è stato verificato che gli acciai selezionati non risultano compatibili con le due miscele bassofondenti.

Come richiesto in fase di valutazione del Progetto, sono di seguito indicate coerenze e disomogeneità del budget preventivato per le attività del presente Progetto 1.9 “Solare termodinamico” del PTR 2025-2027 della RdS con il budget impiegato per attività analoghe del Progetto 1.9 del precedente triennio 2022-2024. Le valutazioni sono riportate facendo riferimento alle 8 linee di ricerca comprese nelle 3 tematiche scientifico-applicative in cui è organizzato l'unico WP (WP1) previsto nel presente Progetto 1.9 “Solare Termodinamico” del triennio 2025-2027 e alle attività di “gestione del Progetto e di comunicazione e disseminazione dei risultati” (altresì comprese nel WP1). Tematica “sistemi di accumulo termico per impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER e per la fornitura di energia su base

stagionale”:

- Con riferimento alla linea di ricerca sulla “comparazione sperimentale tra sistemi di accumulo termico, di tipo termocline a sali fusi, per l'ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER”, le linee di attività LA1.1, LA1.2 e LA1.3 prevedono lo sviluppo e la realizzazione di un nuovo prototipo di sistema di accumulo termico di tipo termocline a sali fusi ibrido, alimentabile sia da energia solare a concentrazione (CSP/CST) che da una differente tecnologia FER “elettrica”, in particolare da fotovoltaico (PV), attraverso l'up-grade del sistema di accumulo termico realizzato (in forma di prototipo) nel precedente triennio. Nell'ambito delle linee di attività LA1.11 e LA1.13 del Progetto 1.9 del PTR 2022-2024, infatti, è stato progettato, realizzato e testato un sistema di stoccaggio termico di tipo termocline ibridizzato costituito da un serbatoio con 3 differenti scambiatori di calore immersi direttamente all'interno del mezzo di accumulo costituito da una miscela di sali ternaria; sia la progettazione che la sperimentazione sono state supportate da attività di simulazione numerica mediante modelli sviluppati ad hoc (LA1.12 e LA1.14). Sono stati realizzati 2 scambiatori di carica a fascio tubiero di forma elicoidale al cui interno circola olio diatermico come fluido di trasferimento di calore, esternamente ai tubi scorre la miscela di sali come mezzo di accumulo termico, questi 2 scambiatori permettono al sistema di essere alimentato sia da un impianto solare a concentrazione che da una caldaia elettrica simulante un impianto PV. Il sistema di accumulo termico è stato quindi collegato, da una parte, al campo solare di tipo Fresnel dell'impianto sperimentale “ENEA-SHIP” già presente nel C.R. ENEA di Casaccia e che è stato opportunamente modificato allo scopo, e, dall'altra, ad un riscaldatore elettrico dell'olio diatermico che simula l'alimentazione del sistema da PV. Immerso all'interno del serbatoio di accumulo è presente un terzo scambiatore della medesima forma dei precedenti 2, utilizzato per scaricare l'energia accumulata. Nel triennio 2025-2027, in continuità con le attività e le infrastrutture già realizzate, è prevista la sostituzione dello scambiatore di carica del tipo olio/sali, connesso alla caldaia elettrica, con resistenze elettriche innovative (che saranno collegate a un generatore che simula l'alimentazione da PV) direttamente immerse nella miscela di sali ternaria: la finalità è eseguire una comparazione tecnico-economica in termini di efficienza di storage, velocità di carica e modularità, tra il nuovo sistema termocline ibridizzato dotato di resistenze elettriche immerse nel mezzo di accumulo e la tecnologia sviluppata e testata nel precedente triennio. In particolare, sono previsti i seguenti interventi per la sola realizzazione del nuovo prototipo di sistema di accumulo ibridizzato: (i) fornitura di materiali per adeguamento dell'interfacciamento e realizzazione del prototipo (costi categoria C.1); (ii) sostituzione scambiatore di calore collegato al riscaldatore elettrico dell'olio con resistenze elettriche da inserire nel serbatoio comprensive di alimentatore, strumentazione e schede di acquisizione (costi categoria B.1). Tali interventi richiedono un investimento di circa 87 k€ con costi ammissibili (cfr. applicazione del criterio della quota d'uso ai costi di categoria B.1) preventivati in circa 51 k€ e beneficeranno dell'investimento già effettuato nel precedente triennio, pari a circa 260 k€, relativo all'appalto che includeva non solo la realizzazione del prototipo di sistema di accumulo termocline a sali fusi ibridizzato con 3 scambiatori a olio diatermico, ma anche la sua implementazione nell'impianto “ENEA-SHIP” che, sempre nell'ambito dell'appalto, veniva opportunamente modificato allo scopo.

- Per la linea di ricerca sui “sistemi di riscaldamento elettrico a microonde dei sali fusi per l'ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER”, si evidenzia che le linee di attività LA1.4, LA1.5, LA1.6, incentrate sul riscaldamento elettrico a microonde dei sali fusi, si sviluppano in sostanziale continuità e coerenza con le attività del precedente triennio, non solo sul piano dei contenuti tecnici, ma anche sul piano delle necessarie risorse economiche. Nell'ambito del precedente triennio, infatti, è stato realizzato un dispositivo sperimentale per la verifica della fattibilità tecnica del riscaldamento elettrico dei sali fusi attraverso le microonde, che ha richiesto un investimento di circa 50 k€ (costi categorie B.1 e C.1) con costi ammissibili (cfr. applicazione del criterio della quota d'uso ai costi di categoria B.1) consuntivati pari a circa 29 k€. Tale dispositivo sperimentale, costituito principalmente da un serbatoio in acciaio collegato ad un generatore di microonde da 3 kWe, ha consentito di confermare la suscettibilità dei sali fusi alle microonde e di individuare le condizioni operative che massimizzano l'assorbimento di energia. Nel triennio 2025-2027, il suddetto dispositivo sarà convertito in un prototipo sperimentale su scala di laboratorio attraverso importanti interventi di aggiornamento e potenziamento al fine di testare la tecnologia nelle condizioni operative ottimali precedentemente individuate. In particolare, il dispositivo verrà accessorizzato con (i) un idoneo sistema sensoristico, immune da interferenze a microonde (costi categoria C.1), (ii) un più efficiente circuito di raffreddamento (costi categoria C.1), (iii) un migliore sistema di isolamento termico (costi categoria C.1), e (iv) un nuovo generatore di microonde con regolazione di frequenza (costi categoria B.1). Tale up-grade del dispositivo sperimentale richiede un investimento totale stimato in circa 92 k€ con costi ammissibili (cfr. applicazione del criterio della quota d'uso ai costi di categoria B.1) preventivati in circa 66 k€, e potrà beneficiare delle risorse già messe in campo nel precedente triennio. L'investimento previsto è coerente con il budget impiegato nel triennio precedente per realizzare il dispositivo sperimentale in considerazione del fatto che l'up-grade che si intende realizzare prevede l'implementazione di componenti e sistemi ben più evoluti e costosi di quelli della dotazione originaria del dispositivo.

- Per la linea di ricerca sui “sistemi di accumulo termico stagionali, di tipo termo-chimico a zeoliti, alimentabili da CST”, il budget richiesto per il nuovo triennio per le LA1.7 e LA1.8 (pari a circa 80 k€ di costi categoria C.1) è da considerarsi coerente con il budget impiegato nel triennio precedente (pari a circa 65 k€ di costi categoria C.1) e verrà utilizzato per effettuare l'up-grade delle facility già implementate nel PTR 2022-2024 con l'obiettivo di sviluppare un nuovo sistema di accumulo termo-chimico a zeoliti ottimizzato per applicazioni stagionali, la cui progettazione sarà orientata sia al miglioramento delle performance energetiche sia alla flessibilità di utilizzo, concependo il nuovo sistema di accumulo in forma modulare e prevedendo la possibilità di utilizzare diversi fluidi termo-vettori per diversificarne il range di utilizzo sia lato utenza che lato produzione.

Tematica “materiali e dispositivi per il monitoraggio degli impianti CSP/CST e l'innovazione dei processi O&M”:

- Con riferimento alla linea di ricerca sui “sensori di sporco/failure degli specchi per la digitalizzazione del campo solare degli

impianti CSP/CST", le attività delle LA1.9 e LA1.10 del nuovo triennio 2025-2027 si configurano come la prosecuzione di quelle precedentemente finanziate sullo sviluppo di rivestimenti autopulenti per specchi solari. Nella fattispecie si vogliono aggiungere requisiti sensoristici ai rivestimenti per poterli rendere autodiagnostici del livello di funzionamento (sporcamento/failure) scalando i risultati dal livello del piccolo prototipo di superficie sensibile piezoelettrica, ottenuta su scala laboratoriale nel triennio precedente, ad un prototipo di maggiori dimensioni finalizzato all'individuazione della massima area interrogabile afferente alla tipologia del sensing distribuito; in altri termini, si intende passare da un piccolo sensore localizzato ad una sorta di "pelle" dello specchio, che possa mediare la discontinuità dell'output sporcamento soprattutto in termini di risposta effettivamente misurabile in un ambiente reale. Per quanto concerne la parte dei sensori ottici, che possano fornire output misurabili attraverso tecniche di imaging di tipo aereo, si prevede l'esplorazione a largo spettro di una serie di materiali, che vanno sintetizzati e caratterizzati al fine di individuare quelli più idonei all'uso proposto. Le attività di ricerca proposte si configurano come novità assoluta nel contesto del CSP/CST, richiedendo pertanto un budget doppio rispetto a quello del triennio precedente e pari a circa 100 k€ per l'acquisizione di materiali di consumo (costi di categoria C.1) e, soprattutto, di strumentazione scientifica varia (costi di categoria B.1) idonea, a titolo di esempio, a misurare effetto piezofotonico, eventuale luminescenza/fotoluminescenza e contestualmente riflettanza speculare sugli specchi rivestiti, oltre che a caratterizzare la struttura dei materiali dei dispositivi sensori; a fronte di tale budget, i costi ammissibili a preventivo (cfr. applicazione del criterio della quota d'uso ai costi di categoria B.1) sono stimati in circa 60 k€.

- Per la linea di ricerca sulla "diagnosi a ultrasuoni per la rilevazione di occlusioni solide nel piping di impianti CSP/CST utilizzando miscele di sali fusi come fluido termovettore", a differenza del budget impiegato nel triennio 2022-2024 per la LA1.20 del Progetto 1.9, nell'ambito della quale era prevista esclusivamente un'attività teorico-numerica con necessità dell'impiego di risorse umane e mezzi di calcolo, il budget richiesto per la presente linea di ricerca (LA1.11 e LA1.12) del triennio 2025-2027 prevede anche costi di categoria C.1 e D.3, preventivati in circa 108 k€, di cui 78 k€ per la realizzazione di un dispositivo prototipale e 30 k€ per l'esecuzione delle attività sperimentali (materiali + servizio di assistenza tecnico-specialistica per circuito a sali fusi).

Tematica "integrazione degli impianti CSP/CST in sistemi di poligenerazione distribuita asserviti a utenze industriali e civili":

- Con riferimento alla linea di ricerca sui "sistemi di cogenerazione distribuita, alimentati da impianti CSP/CST ibridizzati con PV, asserviti a utenze industriali e civili locali", le linee di attività LA1.15 e LA1.16 prevedono la progettazione, realizzazione e sperimentazione di un dimostratore tecnologico prototipale di sistema di cogenerazione distribuita di elettricità e calore, alimentato da impianti solari a concentrazione e fotovoltaici (PV). Il dimostratore sarà composto dal sistema di accumulo termoclineo ibridizzato progettato e realizzato, rispettivamente, nelle LA1.1 e LA1.3 che sarà alimentato sia dall'impianto solare a concentrazione Fresnel "ENEA-SHIP" che da un impianto PV e collegato a un sistema ORC (Organic Rankine Cycle) e a un'interfaccia di processo per la fornitura di energia a utenze locali del C.R. ENEA di Casaccia. Come già discusso in precedenza, nell'ambito delle LA1.11 e LA1.13 del PTR 2022-2024 è stato realizzato un sistema di stoccaggio termico di tipo termoclineo alimentato, da un lato, dell'impianto "ENEA-SHIP" e dall'altro da una caldaia elettrica che simulava un impianto PV. Nel triennio 2025-2027, in continuità con le attività e le infrastrutture realizzate, è previsto l'up-grade del sistema esistente mediante la fornitura e installazione (i) di un impianto PV (costo categoria B.1), (ii) di un sistema ORC per la produzione di energia elettrica (costo categoria B.1), (iii) di tutta la strumentazione e le schede di acquisizione necessarie per il monitoraggio del nuovo dimostratore prototipale (costo categoria B.1) e, infine, (iv) di tutto il materiale necessario alla sua realizzazione (costi categoria C.1). Tale attività di up-grade per la realizzazione del nuovo dimostratore richiede un investimento di circa 315 k€ con costi ammissibili (cfr. applicazione del criterio della quota d'uso ai costi di categoria B.1) preventivati in circa 132 k€ e beneficia dell'investimento già effettuato nel precedente triennio, pari a circa 260 k€, per la realizzazione del sistema di accumulo ibridizzato con 3 scambiatori del tipo olio/sali e la sua implementazione nell'impianto "ENEA-SHIP" oggetto di opportune modifiche. Sempre nell'ambito della presente linea di ricerca, proseguirà lo sviluppo (iniziato nel precedente triennio) dell'innovativo sistema micro-PTC proposto dall'Università degli Studi di Firenze (UniFI) per applicazioni di cogenerazione distribuita in contesti civili e industriali fortemente antropizzati; in particolare, nella linea di attività LA1.14 sarà realizzato un modulo prototipale del sistema micro-PTC di UniFI in "versione up-grade" dotato, tra l'altro, di tubi ricevitori con coating solare ENEA di ultima generazione (oggetto della LA1.13) e che sarà testato collegandolo al dimostratore tecnologico. In merito al budget previsto, pari a circa 45 k€, per materiali e forniture (costi categoria C.1) per la realizzazione del suddetto modulo prototipale in "versione up-grade" del micro-PTC di UniFI, non è possibile confrontarlo con le spese sostenute nel precedente triennio per LA incentrate sulla tecnologia micro-PTC (LA1.4, LA1.5 e LA1.6) perché queste non prevedevano la realizzazione di prototipi o altri prodotti "tangibili". Infatti, nel precedente triennio è stata effettuata un'analisi numerica del potenziale applicativo della tecnologia micro-PTC di UniFI per la generazione distribuita di calore ed elettricità in contesti, civili e industriali, fortemente antropizzati del territorio italiano; inoltre, il micro-PTC di UniFI è stato sperimentato presso la stazione testing dell'impianto Fresnel "ENEA-SHIP" del C.R. ENEA di Casaccia, individuandone criticità e soluzioni migliorative oggetto di uno studio progettuale di up-grade. Con riferimento alla sopra richiamata linea di attività LA1.13 del presente Progetto, questa trae spunto dalle LA1.1 e LA1.2 del precedente triennio di Progetto che erano in carico a ENEA ed erano inerenti ad attività di ricerca su coating innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti CSP/CST a collettori lineari. Nello specifico, nell'ambito della LA1.1, ENEA si è occupata dello sviluppo di materiali e processi di deposizione di tipo sputtering per realizzare coating innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti micro-PTC a media temperatura e per coating innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti CSP/CST ad alta temperatura; la LA1.2 ha previsto, invece, la progettazione ottica e la realizzazione, con processi di tipo sputtering ottimizzati, di coating innovativi impiegando i materiali sviluppati nella precedente LA1.1. Sulla base dei risultati ottenuti nel precedente triennio, la LA1.13 prevede la messa a punto

dei processi di sputtering, sviluppati in precedenza, al fine di fabbricare prototipi di tubi assorbitori per il sistema micro-PTC di UniFl (in gergo tecnico, per “tubo assorbitore” si intende il solo tubo metallico, tipicamente di acciaio, con il coating solare ivi depositato, mentre un “tubo ricevitore evacuato” è costituito dal tubo assorbitore incapsulato sottovuoto in un tubo di vetro e da eventuali parti/materiali accessori quali compensatori di dilatazioni termiche e getter). Come ben noto agli esperti di settore, lo sviluppo di materiali e processi di deposizione (LA1.1) e la successiva realizzazione di coating ottimizzati per gli scopi previsti (LA1.2), rappresenta un’attività di ricerca che richiede un impegno di personale maggiore rispetto alla pur complessa attività di messa a punto di processi di sputtering (LA1.13). Ciò, in sostanza, giustifica il minor costo preventivato (costi categoria A, B e C) per la LA1.13, pari a circa 65 k€ (escluse spese generali), rispetto a quello complessivamente consuntivato nel precedente triennio di Progetto per le LA1.1 e LA1.2, pari a circa 171 k€ (escluse spese generali). Infine, per completezza, si evidenzia che la LA1.17 del presente progetto, incentrata sullo sviluppo di modelli predittivi della producibilità (elettrica/termica) degli impianti CSP/CST basati su architetture Artificial Intelligence / Machine Learning, è completamente nuova e, pertanto, non ha riscontri in analoghe attività del precedente triennio.

- Per la linea di ricerca sull’“analisi delle potenzialità degli impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER per la decarbonizzazione dell’industria”, le attività in carico a PoliMI (LA1.18) sono solo modellistiche e numeriche (non si prevedono attività sperimentali o di realizzazione di dimostratori). La tipologia di attività è la stessa del precedente triennio (LA1.19) ed il budget richiesto è solo lievemente superiore (+14% circa) a causa del maggior numero di ore uomo richieste per le attività di reperimento dati, modellizzazione ed analisi dei risultati, da ripetere per diverse tipologie di industrie.

- La linea di ricerca sullo “studio concettuale dell'utilizzazione di calore solare da impianti a concentrazione per la valorizzazione di matrici organiche residuali mediante processi pirolitici e coproduzione di elettricità”, che prevede la sola LA1.19, risultando completamente nuova, non ha riscontri in analoghe attività del precedente triennio.

Attività di “gestione del Progetto e di comunicazione e disseminazione dei risultati” - Alle attività di project management e dissemination del Progetto 1.9 “Solare Termodinamico” del triennio 2025-2027 sono dedicate le LA1.20 (periodo da Gennaio 2025 a Giugno 2026) e LA1.21 (periodo da Luglio 2026 a Dicembre 2027), entrambe in carico a ENEA. Nel precedente triennio 2022-2024, nel Progetto non erano previste specifiche LA per attività di project management mentre la dissemination è stata oggetto delle LA1.25 (periodo da Gennaio 2022 a Giugno 2023) e LA1.26 (periodo da Luglio 2023 a Dicembre 2024), entrambe in carico a ENEA. Come richiesto in fase di valutazione del Progetto, si fornisce di seguito un maggior dettaglio del budget previsto per le LA1.20 e LA1.21 rispetto a quanto riportato nella “Scheda C3” del presente capitolato di Progetto, specificando le spese preventivate che concorrono all’importo delle diverse voci di costo della “Scheda C3”.

LA1.20 “Gestione del Progetto - Comunicazione e disseminazione dei risultati / Periodo da Gennaio 2025 a Giugno 2026” - Costi totali (escluse spese generali) = 75.800,00 €

Costi di personale (cat. A):

- applicazione del metodo dei “costi di personale standard”;
- impiego di solo “personale dipendente” (cat. A.1);
- impiego di 400 ore di personale di fascia di costo livello “alto” EPR (1 dirigente di ricerca e 7 primi ricercatori), per un costo pari a 400 ore x 61,00 €/ora = 24.400,00 €;
- impiego di 650 ore di personale di fascia di costo livello “medio” EPR (5 ricercatori), per un costo di 650 ore x 36,00 €/ora = 23.400,00 €;
- totale ore di personale a preventivo = 400 ore + 650 ore = 1050 ore;
- totale costi di personale (cat. A) a preventivo = 24.400,00 € + 23.400,00 € = 47.800,00 €.

Costi di esercizio (cat. C):

- previsti costi per “informazione, pubblicità e diffusione correlate alle attività di Progetto” (cat. C.2), d’importo pari a 5.000,00 €, per iscrizione a congressi/convegni/conferenze/workshop, organizzazione eventi, pubblicazione articoli scientifici, materiale divulgativo per attività di informazione, comunicazione e disseminazione dei risultati della ricerca;
- previsti costi per “viaggi e missioni” (cat. C.3), d’importo pari a 23.000,00 €, per attività di (i) gestione Progetto e (ii) informazione, comunicazione e disseminazione dei risultati della ricerca;
- totale costi di esercizio (cat. C) a preventivo = 5.000,00 € + 23.000,00 € = 28.000,00 €.

LA1.21 “Gestione del Progetto - Comunicazione e disseminazione dei risultati / Periodo da Luglio 2026 a Dicembre 2027” - Costi totali (escluse spese generali) = 96.300,00 €

Costi di personale (cat. A):

- applicazione del metodo dei “costi di personale standard”;
- impiego di solo personale dipendente (cat. A.1);
- impiego di 500 ore di personale di fascia di costo livello “alto” EPR (2 dirigenti di ricerca e 7 primi ricercatori), per un costo pari a 500 ore x 61,00 €/ora = 30.500,00 €;
- impiego di 800 ore di personale di fascia di costo livello “medio” EPR (7 ricercatori), per un costo di 800 ore x 36,00 €/ora = 28.800,00 €;
- totale ore di personale a preventivo = 500 ore + 800 ore = 1300 ore;
- totale costi di personale (cat. A) a preventivo = 30.500,00 € + 28.800,00 € = 59.300,00 €.

Costi di esercizio (cat. C):

- previsti costi per “informazione, pubblicità e diffusione correlate alle attività di Progetto” (cat. C.2), d’importo pari a 12.000,00 €, per iscrizione a congressi/convegni/conferenze/workshop, organizzazione eventi, pubblicazione articoli scientifici, materiale divulgativo per attività di informazione, comunicazione e disseminazione dei risultati della ricerca;
- previsti costi per “viaggi e missioni” (cat. C.3), d’importo pari a 25.000,00 €, per attività di (i) gestione Progetto e (ii) informazione, comunicazione e disseminazione dei risultati della ricerca;
- totale costi di esercizio (cat. C) a preventivo = 12.000,00 € + 25.000,00 € = 37.000,00 €.

Per completezza, si evidenzia che i costi (sia di cat. A che di cat C) preventivati per la LA1.20 sono minori di quelli preventivati per la LA1.21 perché è fisiologico che le attività di comunicazione e disseminazione si intensifichino nella seconda parte del Progetto.

Sono discusse di seguito coerenze e disomogeneità dei costi della LA1.20 e LA1.21 sopra dettagliati con il budget impiegato nel triennio precedente per le LA1.25 e LA1.26 che, si ribadisce, non includevano l’attività di gestione del Progetto.

In merito ai costi di esercizio “cat. C”:

- I costi di cat. C consuntivati per la LA1.25 sono stati particolarmente contenuti e, nella fattispecie, pari a circa 12,6 k€.
- I costi di cat. C sostenuti e rendicontati per la LA1.26 sono stati pari a circa 47,5 k€. Oltre a tali costi, ENEA ha sostenuto per l’esecuzione della LA1.26 ulteriori 4,7 k€ di costi di cat. C che non ha potuto esporre a consuntivo (causa superamento del contributo totale massimo ammesso dal capitolato di Progetto). Quindi, il totale dei costi di cat. C sostenuti (rendicontati e non) da ENEA per la LA1.26 ammonta a 52,2 k€. In merito a tali costi della LA1.26 è necessario evidenziare quanto di seguito. A Ottobre 2024 si è tenuta a Roma la “Conferenza SolarPACES”, che è il principale evento mondiale sul CSP/CST e che è tornata in Europa dopo oltre un decennio; peraltro, il chairman della Conferenza è stato un ricercatore ENEA che lavorava al Progetto 1.9 e che è il delegato nazionale nel Comitato Esecutivo del “Technical Collaboration Programme (TCP) IEA SolarPACES”. Per ovvi motivi, la partecipazione del Progetto 1.9 alla “Conferenza SolarPACES 2024” è stata molto rilevante, con costi di cat. C sostenuti nella LA1.26 pari a circa 22,5 k€. Considerato quanto esposto, i costi di cat. C sostenuti da ENEA per la LA1.26, scorporati quelli specifici dovuti alla partecipazione del Progetto 1.9 alla “Conferenza SolarPACES 2024” tenuta in Italia (da ritenersi evento fuori dall’ordinario che non si ripeterà nel prossimo triennio), sono pari a circa 29,7 k€.

Da un confronto tra i costi di cat. C preventivati per le LA1.20 e LA1.21 del Progetto 1.9 del PTR 2025-2027 e quelli sostenuti per le LA1.25 e LA1.26 (nell’ipotesi di lavoro di assenza della “Conferenza SolarPACES 2024” tenuta in Italia) del Progetto 1.9 del PTR 2022-2024, si conclude che:

- I costi di cat. C preventivati per la LA1.20 della nuova proposta di Progetto, pari a 28 k€, sono maggiori di quelli consuntivati per la LA1.25 del Progetto del precedente triennio, pari a circa 12,6 k€. Considerato che la LA1.20 comprende l’attività di gestione del Progetto non prevista nella LA1.25 (con possibili maggiori costi per viaggi e missioni nella LA1.20 rispetto alla LA1.25), si ritiene che i costi di cat. C preventivati per la LA1.20 siano coerenti con quelli del triennio precedente e adeguati all’efficace esecuzione della medesima LA1.20.
  - I costi di cat. C preventivati per la LA1.21 della nuova proposta di Progetto, pari a 37 k€, sono maggiori di quelli sostenuti per la LA1.26 del Progetto del precedente triennio, pari a circa 29,7 k€. Considerato che la LA1.21 comprende l’attività di gestione del Progetto non prevista nella LA1.26 (con possibili maggiori costi per viaggi e missioni nella LA1.21 rispetto alla LA1.26), si ritiene che i costi di cat. C preventivati per la LA1.21 siano coerenti con quelli del triennio precedente e adeguati all’efficace esecuzione della medesima LA1.21.
- In merito ai costi di personale “cat. A”, considerando le ore totali consuntivate nel Progetto 1.9 del precedente PTR 2022-2024 della RdS per le LA1.25 e LA1.26 (sempre nell’ipotesi di lavoro di assenza della “Conferenza SolarPACES 2024” tenuta in Italia), queste ammontano a circa 1150 ore per un costo totale di cat. A di circa 53,5 k€ (ottenuto applicando il metodo dei “costi di personale standard”). Oltre a tali costi, ENEA ha sostenuto ulteriori 10,8 k€ di costi di cat. A che non ha potuto esporre a consuntivo (causa superamento del contributo totale massimo ammesso dal capitolato di Progetto) per l’impiego di ulteriori 200 ore di personale resesi necessarie per l’esecuzione della LA1.26. Quindi, sempre nell’ipotesi di lavoro di assenza della “Conferenza SolarPACES 2024” tenuta in Italia, il totale dei costi di cat. A sostenuti da ENEA (rendicontati e non) per le LA1.25 e LA1.26 ammonta a circa 64,3 k€, corrispondenti all’impiego di circa 1350 ore totali di personale.

Il totale di ore preventivate per le LA1.20 e LA1.21 della proposta di Progetto 1.9 ammonta a 2350 ore, per un costo totale di cat. A di poco inferiore a 107 k€, e risultano nettamente maggiori di quelli relativi alle LA1.25 e LA1.26 del Progetto del precedente triennio. Considerato che le LA1.20 e LA1.21 comprendono l’attività di gestione del Progetto non prevista nelle LA1.25 e LA1.26, si ritiene che le ore di personale e i relativi costi di cat. A preventivati per le LA1.20 e LA1.21 siano coerenti con quelli del triennio precedente e adeguati all’efficace esecuzione delle medesime LA1.20 e LA1.21.

In conclusione, per quanto attiene ai costi complessivamente preventivati per le LA1.20 e LA1.21 della proposta di Progetto 1.9 del PTR 2025-2027, pur considerata la mole e la complessità delle attività di ricerca di Progetto, si ritiene che tali costi siano coerenti con quelli del triennio precedente e consentiranno di portare avanti efficacemente le attività di project management e di disseminazione di Progetto.

Come richiesto in fase di valutazione del Progetto, sono di seguito specificamente indicate coerenza e continuità delle attività del presente Progetto 1.9 “Solare termodinamico” del PTR 2025-2027 della RdS con i risultati ottenuti per attività analoghe del Progetto 1.9 del precedente triennio 2022-2024. Le valutazioni sono riportate facendo riferimento alle 8 linee di ricerca (inserite nell’ambito delle tematiche scientifico-applicative di riferimento) e alle attività di “gestione del Progetto e di comunicazione e disseminazione dei risultati”

previste nella struttura del presente Progetto del triennio 2025-2027.

Tematica “sistemi di accumulo termico per impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER e per la fornitura di energia su base stagionale”:

- Con riferimento alla linea di ricerca sulla “comparazione sperimentale tra sistemi di accumulo termico, di tipo termocline a sali fusi, per l'ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER”, le attività previste nel nuovo triennio 2025-2027 sono in perfetta continuità con le attività svolte nel precedente triennio in quanto hanno l'obiettivo di studiare differenti tecnologie per ottenere sistemi di accumulo termici ibridizzati tra CSP/CST e differenti tecnologie da fonti rinnovabili “elettriche”, in primis PV. In particolare, lo scopo delle nuove linee di attività è rappresentato proprio da una comparazione tra la tecnologia studiata nel PTR 2022-2024 e un nuovo sistema di riscaldamento del mezzo di accumulo in grado di ibridizzare il sistema.
- Per la linea di ricerca sui “sistemi di riscaldamento elettrico a microonde dei sali fusi per l'ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER”, si evidenzia che, in continuità con il triennio precedente, l'obiettivo è avanzare nello sviluppo tecnologico dell'innovazione proposta, superando i risultati ottenuti (realizzazione e caratterizzazione di un “proof of concept”). Si mira a potenziare tale dispositivo fino a convertirlo in un prototipo su scala di laboratorio, da testare in condizioni operative ottimali per simulare sistemi di accumulo reali. La linea di ricerca si articolerà nelle seguenti tre fasi: (1) valutazione sperimentale delle proprietà dielettriche dei sali fusi, sia binari che ternari, in un ampio intervallo termico operativo (190-550 °C), al fine di colmare l'attuale lacuna scientifica e costruire modelli numerici idonei alla previsione di sistemi operanti in condizioni ottimali in termini di efficienza e rapidità di risposta; (2) individuazione degli interventi migliorativi sul dispositivo prototipale, con particolare attenzione al sistema sensoristico, al fine di consentire la sperimentazione del serbatoio di sali fusi nelle condizioni operative ottimali; (3) svolgimento della campagna sperimentale, con la caratterizzazione della risposta del sistema di accumulo termico ai transitori di carica elettrotermica in condizioni di massima efficienza.
- Per la linea di ricerca sui “sistemi di accumulo termico stagionali, di tipo termo-chimico a zeoliti, alimentabili da CST”, le attività rappresentano il naturale prosieguo di quelle svolte nel precedente triennio della RdS e si propongono di esplorare le potenzialità di tali tecnologie di accumulo (basate su sistemi termo-chimici a zeoliti alimentati da CST) in applicazioni che richiedono un uso stagionale del calore immagazzinato, con conseguente valutazione delle performance ottenibili su medio-lungo periodo e a diverse temperature di utilizzo (comprese tra 90 e 250 °C).

Tematica “materiali e dispositivi per il monitoraggio degli impianti CSP/CST e l'innovazione dei processi O&M”:

- Con riferimento alla linea di ricerca sui “sensori di sporco/failure degli specchi per la digitalizzazione del campo solare degli impianti CSP/CST”, l'obiettivo di ridurre le spese di ordinaria manutenzione degli specchi solari, riducendo il consumo di acqua di lavaggio attraverso rivestimenti autopulenti potenziati per essere anche autodiagnostici, rappresenta sia il trait d'union rispetto alla ricerca che nel precedente triennio ha già raggiunto la fase del prototipo di larga scala di specchi autopulenti, sia il primo passo verso l'ottenimento di sistemi che consentano di digitalizzare la gestione di un campo solare.
- Per la linea di ricerca sulla “diagnosi a ultrasuoni per la rilevazione di occlusioni solide nel piping di impianti CSP/CST utilizzando miscele di sali fusi come fluido termovettore”, in continuità con le attività svolte nell'ambito della LA1.20 del triennio 2022-2024, la tecnologia per la rilevazione di occlusioni solide nel piping di impianti CSP/CST a sali fusi, precedentemente analizzata solo a livello numerico e di configurazione preliminare (progetto di massima) al fine valutare la possibilità di sviluppare un dispositivo diagnostico a ultrasuoni, verrà sperimentata realizzando un dispositivo prototipale da testare sul circuito dell'impianto “MoSE” (Molten Salt Experiments) operativo presso il C.R. ENEA di Casaccia.

Tematica “integrazione degli impianti CSP/CST in sistemi di poligenerazione distribuita asserviti a utenze industriali e civili”:

- Con riferimento alla linea di ricerca sui “sistemi di cogenerazione distribuita, alimentati da impianti CSP/CST ibridizzati con PV, asserviti a utenze industriali e civili locali”, le attività previste per le LA1.15 e LA1.16 nel triennio 2025-2027 sono coerenti e in continuità con le attività svolte nel precedente triennio in quanto hanno l'obiettivo di realizzare e studiare un prototipo di sistema ibrido alimentato da solare a concentrazione e fotovoltaico per la cogenerazione distribuita in contesti civili ed industriali. Partendo, quindi, dal prototipo di sistema di stoccaggio termico di tipo termocline ibridizzato sviluppato nel precedente triennio e asservito all'impianto “ENEA-SHIP”, le attività prevedono l'up-grade del suddetto prototipo (LA1.1, LA1.2, LA1.3 della prima linea di ricerca) e la sua integrazione con un impianto PV ed un sistema ORC per la produzione di energia elettrica per utenze locali del C.R. ENEA Casaccia (LA1.15 e LA1.16). Con riferimento alle attività della LA1.14 di sviluppo e realizzazione di un up-grade del sistema micro-PTC di UniFI per applicazioni di cogenerazione distribuita di elettricità (con cicli ORC) e calore di processo (a media temperatura) in contesti civili e industriali fortemente antropizzati, queste sono coerenti e in continuità con le LA1.4, LA1.5 e LA1.6 del triennio precedente. Nell'ambito della LA1.4 UniFI ha effettuato un'analisi numerica del potenziale applicativo della tecnologia micro-PTC per la generazione distribuita di calore ed elettricità in contesti, civili e industriali, fortemente antropizzati del territorio italiano. Nella LA1.5 ENEA ha caratterizzato il prototipo di micro-PTC di UniFI presso la stazione testing dell'impianto sperimentale Fresnel “ENEA-SHIP” del C.R. ENEA di Casaccia, individuandone criticità (limitata efficienza e bassi valori d'intercept factor) ma verificando che il sistema è in grado di produrre calore fino a 300 °C e, potenzialmente, anche fino a 350 °C. Sulla base dei risultati della LA1.5, nella LA1.6 UniFI ha condotto uno studio progettuale di up-grade del prototipo di micro-PTC per il suo impiego a  $T \leq 350$  °C, individuandone possibili miglioramenti nel tubo ricevitore (in particolare nel coating), sistema di tracking, riflettore parabolico, telaio, processo costruttivo e assemblaggio. L'analisi della LA1.4 è stata riconsiderata per valutare i vantaggi dell'impiego di una “versione up-grade” del micro-PTC con coating del tubo ricevitore migliorato. Sulla base dei

risultati del triennio precedente (in particolare della LA1.5 e LA1.6) nella LA1.14 di Progetto del nuovo triennio, nell'ottica di una riconsiderazione di dettagli del sistema micro-PTC di UniFI, si prevede di studiare: (i) l'ottimizzazione della struttura e dei sostegni per minimizzare l'area occupata a parità di area utile/captante; (ii) un layout che consenta la sostituzione dei tubi ricevitori da entrambe le estremità (evitando di dover passare necessariamente dal lato con mandata/ritorno isolati); (iii) una metodologia di costruzione del tubo ricevitore, dotato di coating solare ENEA di ultimissima generazione (oggetto della LA1.13) e ottimizzato per operare in vuoto fino a 350 °C (e, possibilmente, fino a 400 °C), con vita utile di almeno 25 anni; (iv) il miglioramento del sistema di tracking; (v) nuove tecniche di produzione delle parabole, dato che l'attuale procedimento costruttivo prevede diversi passaggi manuali con ripercussioni sulla ripetibilità delle performance. Inoltre, nella LA1.14, si vogliono implementare gli interventi migliorativi individuati, possibilmente a partire da quelli più impattanti e compatibilmente con le risorse disponibili, per realizzare un modulo prototipale del sistema micro-PTC di UniFI in "versione up-grade". La linea di attività LA1.13 del presente Progetto prevede la messa a punto di processi di sputtering per la fabbricazione di prototipi di tubi assorbitori per il sistema micro-PTC di UniFI. Tale linea si basa sui risultati ottenuti nel precedente triennio di Progetto in cui ENEA si è occupata dello sviluppo dei materiali e dei relativi processi di deposizione realizzando, in forma di prototipo, un coating innovativo a elevate prestazioni fototermiche (assorbanza solare pari a 96.13% ed emissività termica, a 350 °C, pari a 7.12%) e ad alta stabilità (vita utile di almeno 25 anni per impiego fino a 350 °C in vuoto), idoneo per il sistema micro-PTC di UniFI. I processi di deposizione di tipo sputtering sviluppati per lo scopo sono risultati semplici, robusti, a basso costo e caratterizzati da un'elevata velocità di crescita dei materiali costituenti il coating (alta produttività per basso costo del componente). Coerentemente e in continuità con i risultati del precedente triennio, la LA1.13 è finalizzata alla messa a punto di tali processi al fine di realizzare una serie di prototipi di tubi assorbitori solari (tubo di acciaio con il coating solare ivi depositato) idonei per il nuovo modulo prototipale in "versione up-grade" del sistema micro-PTC di UniFI, mirando, nello specifico, alla realizzazione di coating le cui prestazioni fototermiche dovranno risultare quanto più prossime possibili a quelle ottenute nel precedente triennio. In particolare, saranno realizzati n° 24 spezzoni (lunghezza di circa 50 cm) di prototipi di tubi assorbitori (numero che tiene conto delle caratteristiche geometriche del sistema micro-PTC) il cui coating solare dovrà assicurare un'assorbanza solare maggiore del 95% e un'emissività termica, a 350 °C, inferiore dell'8%. Inoltre, sempre nell'ambito della LA1.13, sarà verificata la possibilità di utilizzo dei prototipi di tubo assorbitore (che di fatto impiegheranno un coating progettato, ottimizzato, realizzato e testato per i 350 °C) fino alla temperatura massima operativa di 400 °C, valutando le prestazioni fototermiche del coating che dovrà assicurare un'assorbanza solare maggiore del 95%, un'emissività termica, a 400 °C, inferiore del 9%, elevata stabilità termica alla temperatura operativa di 400 °C tale da garantire una vita utile di almeno 25 anni.

- Per la linea di ricerca sull'"analisi delle potenzialità degli impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER per la decarbonizzazione dell'industria", si evidenzia che nel precedente triennio di Progetto sono stati considerati ed ottimizzati impianti ibridi CSP-PV-Eolici di piccola (1-10 MW) e grande taglia (50 MW) per la sola produzione di energia elettrica. A tal scopo sono stati sviluppati modelli di cicli vapore, cicli ORC, PV, turbine eoliche, sistemi di accumulo termico, batterie e campi solari a concentrazione che sono stati integrati nel codice di ottimizzazione AES-OPT (precedentemente sviluppato da PoliMI per l'ottimizzazione del progetto di impianti ibridi, microreti, virtual power plants, ecc.). Nel triennio 2025-2027, lo stesso codice AES-OPT e gli stessi modelli di componenti saranno usati per ottimizzare impianti ibridi CSP/CST-PV-Eolici che cogenerano energia elettrica e calore a medio-alta temperatura per utenze industriali. Pertanto, le attività in carico a PoliMI in questo nuovo triennio di Progetto sono coerenti ed in continuità con le attività svolte nel precedente triennio.

- La linea di ricerca sullo "studio concettuale dell'utilizzazione di calore solare da impianti a concentrazione per la valorizzazione di matrici organiche residuali mediante processi pirolitici e coproduzione di elettricità", risultando completamente nuova, non ha riscontri in analoghe attività del precedente triennio.

Attività di "gestione del Progetto e di comunicazione e disseminazione dei risultati" - L'attività di dissemination prevista per il Progetto nel triennio 2025-2027 è perfettamente coerente con quella prevista e svolta nel precedente triennio 2022-2024, mentre quella di project management prende spunto dalla positiva esperienza del precedente triennio che si era basata sull'implementazione di un "Piano di Coordinamento" nel capitolato di Progetto e sull'istituzione di un "Comitato di Coordinamento" (CdC). La scelta di aver dedicato nel Progetto 2 linee di attività (LA1.20 e LA1.21), oltre che alla dissemination, anche al project management è fondamentalmente dovuta alla volontà di rafforzare ulteriormente l'attività di gestione, anche in considerazione della complessità e innovatività tecnico-scientifica del Progetto.

Come richiesto in fase di valutazione del Progetto, è fornita una valutazione critica di quanto ottenuto per le attività del Progetto 1.9 del precedente triennio 2022-2024 da cui derivano attività del presente Progetto 1.9 "Solare Termodinamico" del PTR 2025-2027 della RdS. In particolare, per tali attività del precedente triennio (nessuna delle quali ha subito modifiche progettuali rispetto alla pianificazione originaria) sono di seguito evidenziati gli obiettivi effettivamente raggiunti e gli elementi riutilizzabili nel nuovo triennio. Le valutazioni sono riportate facendo riferimento alle 8 linee di ricerca (inserite nell'ambito delle tematiche scientifico-applicative di riferimento) e alle attività di "gestione del Progetto e di comunicazione e disseminazione dei risultati" previste nella struttura del presente Progetto del triennio 2025-2027.

Tematica "sistemi di accumulo termico per impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER e per la fornitura di energia su base stagionale":

- Con riferimento alla linea di ricerca sulla "comparazione sperimentale tra sistemi di accumulo termico, di tipo termocline a sali fusi, per

l'ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER", si evidenzia che nel precedente triennio è stato progettato, realizzato e testato un nuovo prototipo di sistema di accumulo termico di tipo termoclineo alimentato sia da un impianto solare a concentrazione (CSP/CST) che da fotovoltaico (PV). È stato possibile dimostrare la fattibilità dell'accoppiamento delle due differenti tecnologie solari, studiando e mettendo a punto le strategie operative per sistemi di accumulo termico di questo tipo. Inoltre, è stato possibile valutare nel dettaglio il comportamento dei singoli componenti del prototipo di accumulo ibridizzato ed evidenziare gli aspetti tecnologici che necessitano di maggiori approfondimenti e ottimizzazioni. Come già evidenziato, per le attività del nuovo triennio sarà riutilizzato il sistema di accumulo termoclineo ibridizzato realizzato nel precedente triennio (con particolare riferimento al serbatoio, allo scambiatore di carica da CSP/CST e a quello di scarica) che sarà oggetto di opportune modifiche/up-grade per renderlo idoneo per le nuove necessità sperimentali.

- Per la linea di ricerca sui "sistemi di riscaldamento elettrico a microonde dei sali fusi per l'ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER", si evidenzia che nel precedente triennio è stata condotta un'analisi comparativa di sistemi innovativi per il riscaldamento elettrico di sali fusi, con particolare attenzione alle tecnologie a induzione e microonde. Tale indagine è stata motivata dalla potenziale maggiore efficacia di queste ultime rispetto al riscaldamento per effetto Joule, basato su resistenze elettriche immerse nei sali fusi. Dall'analisi comparativa delle tre tecnologie di riscaldamento, la tecnologia a microonde ha evidenziato caratteristiche di elevato potenziale in termini di: (i) prestazioni (elevata potenza trasferibile ai sali fusi, indipendentemente dalla loro temperatura, unitamente a efficienza e rapidità di carica); (ii) fattibilità tecnologica (possibilità di validazione sperimentale in ambiente di laboratorio); (iii) scalabilità (potenziale applicabilità in sistemi di accumulo termico per impianti CSP/CST di dimensioni reali). Avvalendosi di un'analisi numerica condotta tramite un modello specificamente sviluppato, è stato progettato un dispositivo da laboratorio finalizzato alla sperimentazione del riscaldamento a microonde di sali fusi. Tale dispositivo è stato impiegato per la caratterizzazione delle prestazioni termiche del concept proposto. In particolare, attraverso il dispositivo è stato possibile non solo accertare che i sali fusi sono suscettibili alle microonde ma anche che la potenza elettrica scaricabile sui sali fusi per effetto del riscaldamento con microonde è maggiore rispetto al riscaldamento di tipo resistivo (effetto Joule). È stato altresì verificato che l'efficienza dell'assorbimento delle microonde da parte dei sali fusi è significativamente influenzata dalla frequenza di generazione del magnetron. Infatti, è emerso che la frequenza di generazione ottimale, atta a minimizzare il coefficiente di riflessione della cavità, è strettamente correlata alla temperatura dei sali e che il magnetron acquisito non è idoneo ad operare il sistema in condizioni ottimali. In merito agli elementi del pregresso considerati riutilizzabili nel nuovo triennio, come già evidenziato, l'intero apparato sperimentale precedentemente sviluppato nell'ambito del triennio 2022-2024 (comprensivo di serbatoio di accumulo, guida d'onda, Vector Network Analyzer e sistema di acquisizione dati e controllo) sarà impiegato per la realizzazione del nuovo prototipo sperimentale, previa opportuna attività di aggiornamento e potenziamento. Parallelamente all'impiego dell'hardware esistente, nel nuovo triennio le attività di sviluppo teorico e modellistico si innesteranno sui risultati precedentemente conseguiti, sia per garantire le migliori prestazioni del prototipo sperimentale, sia al fine di migliorare l'attendibilità delle analisi prospettive della tecnologia. In particolare, partendo dalle evidenze sperimentali pregresse, la principale sfida tecnica del nuovo triennio di ricerca risiede nell'assicurare, in ogni condizione operativa del sistema di accumulo termico, la minima riflessione e il massimo assorbimento delle microonde. Tale obiettivo potrà essere conseguito mediante la regolazione dinamica della frequenza di generazione delle microonde in funzione della temperatura dei sali. A tal fine, si renderà principalmente necessario acquisire un magnetron dotato di regolatore di frequenza e implementare sul serbatoio un sistema sensoristico efficace e accurato, immune da interferenze a microonde (ad esempio, fibre ottiche o termocoppie schermate in sostituzione delle attuali termocoppie).

- Per la linea di ricerca sui "sistemi di accumulo termico stagionali, di tipo termo-chimico a zeoliti, alimentabili da CST", si evidenzia che nel corso del PTR 2022-2024 è stata messa a punto una facility di test che ha consentito la caratterizzazione di accumuli termo-chimici ad adsorbimento (operanti fino a 250 °C), valutandone le potenzialità di utilizzo attraverso la sperimentazione in diverse condizioni operative che hanno consentito sia di validare i modelli di previsione delle loro performance sia di caratterizzare le dinamiche di accumulo e rilascio del calore durante le fasi di desorbimento/adsorbimento del vapore. Gli elementi del pregresso considerati riutilizzabili sono il know-how sviluppato e le facility di test implementate nel precedente triennio.

Tematica "materiali e dispositivi per il monitoraggio degli impianti CSP/CST e l'innovazione dei processi O&M":

- Con riferimento alla linea di ricerca sui "sensori di sporco/failure degli specchi per la digitalizzazione del campo solare degli impianti CSP/CST", gli obiettivi raggiunti nel corso del precedente triennio sono esattamente quelli attesi, ovvero riuscire a scalare dal laboratorio al mondo reale la tecnologia del rivestimento autopulente. Sono stati, infatti, fabbricati e caratterizzati in campo specchi solari autopulenti di dimensioni reali, implementati nel campo solare Fresnel dell'impianto sperimentale "ENEA-SHIP" del C.R. ENEA di Casaccia. Si evidenzia che vi è totale continuità delle attività del nuovo triennio, in particolare nell'adoperare le formulazioni di base autopulenti già testate come matrici cui conferire nuove skill. Inoltre, i rivestimenti sensori piezoelettrici a base di nitruro di alluminio ottenuti su piccola scala saranno soggetti ad uno scaling-up secondo un approccio metodologico già consolidato nel triennio precedente.

- Per la linea di ricerca sulla "diagnosi a ultrasuoni per la rilevazione di occlusioni solide nel piping di impianti CSP/CST utilizzando miscele di sali fusi come fluido termovettore", si evidenzia che i risultati delle simulazioni numeriche eseguite nell'ambito della LA1.20 del precedente triennio e lo sviluppo di mappe di probabilità che collegano i livelli di attenuazione degli impulsi ultrasonori a possibili valori del livello di porosità di una sezione di tubazione, sia in corrispondenza di tratti rettilinei che in prossimità di curve e/o valvole, hanno fornito, unitamente all'analisi delle diverse tipologie di sensori, indicazioni incoraggianti per lo sviluppo di un dispositivo prototipale agli ultrasuoni per la rilevazione della presenza di occlusioni solide nelle tubazioni degli impianti CSP/CST che utilizzano sali fusi. Nell'ambito della LA1.20 del PTR 2022-2024 non si sono verificate modifiche dei risultati/prodotti ottenuti rispetto a quanto previsto dalla

pianificazione originaria. In particolare, sono state individuate le specifiche tecniche inerenti alla componentistica necessaria per la realizzazione di una configurazione preliminare di un dispositivo basato sull'utilizzo della tecnologia ad ultrasuoni per la determinazione di occlusioni solide all'interno del piping di impianti CSP/CST a sali fusi. In merito agli elementi del pregresso considerati riutilizzabili nel nuovo triennio, come già evidenziato, lo sviluppo del dispositivo di diagnosi ad ultrasuoni previsto nell'ambito della presente linea di ricerca si baserà sui principali risultati inerenti, in particolare, alla metodologia di analisi utilizzata, alla frequenza operativa più idonea per l'applicazione in oggetto ed alle caratteristiche tecniche dei trasduttori e della componentistica individuati, sebbene con riferimento esclusivamente all'impiego di modelli numerici, nell'ambito del precedente triennio.

Tematica "integrazione degli impianti CSP/CST in sistemi di poligenerazione distribuita asserviti a utenze industriali e civili":

- Con riferimento alla linea di ricerca sui "sistemi di cogenerazione distribuita, alimentati da impianti CSP/CST ibridizzati con PV, asserviti a utenze industriali e civili locali", si evidenzia che durante il triennio precedente, nell'ambito delle linee di attività LA1.11 e LA1.13, è stato sviluppato, realizzato e testato un innovativo prototipo di sistema di accumulo termico, di tipo termoclino a sali fusi, ibridizzato che può essere alimentato sia da energia solare a concentrazione (CSP/CST) che da fotovoltaico (PV). Queste attività hanno permesso di dimostrare la validità dell'integrazione delle due tecnologie, attraverso lo studio e la definizione di strategie operative specifiche per sistemi di accumulo termico di tipo termoclino ibridizzati tra CSP/CST e PV. In merito alla tecnologia micro-PTC proposta da UniFI, l'idea di un collettore di piccole dimensioni in grado di garantire prestazioni paragonabili a quelle dei grandi PTC ha sempre destato ammirazione tra gli addetti ai lavori; le sue caratteristiche di modularità uniche, inclusa la possibilità di essere installato in una vasta gamma di luoghi (vedi coperture di edifici), ne accrescono l'attrattiva, in quanto consentono ai sistemi CST/CSP di essere impiegati in settori fino ad ora preclusi (vedi aree urbane e aree industriali fortemente antropizzate). Nel precedente triennio, non solo gli aspetti funzionali della tecnologia micro-PTC ma anche quelli connessi alla sostenibilità economica (LCOH e LCOE) sono stati investigati. In particolare, nella LA1.4 del precedente triennio è stata effettuata un'analisi numerica del potenziale applicativo della tecnologia micro-CSP basata sull'innovativo prototipo di sistema micro-PTC, sviluppato da UniFI in attività precedente a quelle di Progetto, per la generazione distribuita di calore ed elettricità in contesti fortemente antropizzati del territorio italiano. Sono stati considerati 3 casi studio, 2 applicazioni di processo industriale a media temperatura (160 °C e 350 °C) e una civile (utenza residenziale PED); la producibilità annua del micro-PTC è stata stimata per differenti siti (a diversa DNI) lungo il territorio nazionale; la sostenibilità economica è stata valutata utilizzando metodologia LCOH e LCOE. Nella LA1.5 il micro-PTC di UniFI è stato caratterizzato presso la stazione testing dell'impianto sperimentale Fresnel "ENEA-SHIP" del C.R. ENEA di Casaccia, individuando alcune criticità quali la limitata efficienza (dovuta agli elevati valori di emissività termica del coating dei tubi ricevitori attualmente in dotazione) e bassi valori di intercept factor (imputabili, oltre che all'incertezza delle misure ottiche, anche al processo costruttivo del concentratore micro-PTC e della struttura del modulo di parabola dei singoli concentratori); le prove condotte hanno comunque dimostrato che il micro-PTC di UniFI è in grado di produrre calore fino a  $T = 300$  °C e, potenzialmente anche fino a  $T = 350$  °C. Nella LA1.6 è stato condotto uno studio progettuale di up-grade del prototipo di micro-PTC per il suo impiego (con  $T \leq 350$  °C) per cogenerazione di calore di processo a media T e energia elettrica con un ciclo ORC. Lo studio si è incentrato su una modellazione FEM atta a valutare e superare le criticità individuate nella LA1.5, con special riguardo alle elevate dispersioni termiche del tubo ricevitore; sono stati individuati possibili miglioramenti oltre che del tubo ricevitore (in particolare nel coating solare), anche nel sistema di tracking, nel riflettore parabolico e inerenti alla riorganizzazione del collettore a livello di telaio, processo costruttivo e assemblaggio. I casi studio analizzati nella LA1.4 sono stati riconsiderati per valutare i miglioramenti energetici ed economici ottenibili dall'impiego di una versione up-grade del micro-PTC di UniFI ottenuta tramite il solo miglioramento del coating del tubo ricevitore. La linea di attività LA1.13 del presente Progetto, che prevede la messa a punto di processi di sputtering per la fabbricazione di prototipi di tubi assorbitori per il sistema micro-PTC di UniFI, trae spunto da attività del PTR 2022-2024 caratterizzate da due principali obiettivi. Il primo obiettivo, cui direttamente deriva la LA1.13, ha riguardato la realizzazione di coating innovativi a elevate prestazioni fototermiche e ad alta stabilità per tubi ricevitori solari evacuati di sistemi solari a concentrazione di tipo micro-PTC operanti a media temperatura ( $\leq 350$  °C). Tale obiettivo è stato completamente raggiunto. Sono stati realizzati coating mediante materiali metallici (W, Ag), CERMET a doppio nitrato (WN-AIN) e materiali ceramici (AIN, SiO<sub>2</sub>) sviluppati nell'ambito del triennio di Progetto. La stabilità termica dei coating è stata valutata sottoponendo un coating dalle prestazioni fototermiche non ottimizzate a test accelerati di invecchiamento condotti a 620 e 650 °C, i quali hanno evidenziato un degrado praticamente nullo delle prestazioni fototermiche dopo una vita utile di 25 anni a 350 °C. Quattro progetti ottici dalle prestazioni fototermiche ottimizzate sono stati sviluppati per applicazioni a 200, 250, 300 e 350 °C; i coating relativi a questi quattro progetti ottici erano caratterizzati da un'assorbanza solare maggiore del 96% e un'emissività termica del 4.89% a 200 °C, 5.40% a 250 °C, 6.01% a 300 °C e 6.64% a 350 °C. È stato quindi sperimentalmente realizzato il progetto ottico con parametri fototermici ottimizzati per i 350 °C e il coating risultante presentava un'assorbanza solare pari a 96.13% e un'emissività termica, a 350 °C, pari a 7.12%. Infine, è stato realizzato un prototipo di coating per tubo ricevitore evacuato dell'impianti micro-CSP di tipo micro-PTC di UniFI per applicazioni fino a 350 °C. Anche il secondo obiettivo delle attività del PTR 2022-2024 (non direttamente connesso alle attività della LA1.13 del triennio 2025-2027) è stato completamente raggiunto. Esso ha riguardato la realizzazione di un coating innovativo, con riflettore a infrarossi di Ag, per tubi ricevitori evacuati di impianti CSP/CST operanti fino a 550 °C. Il coating realizzato ha mostrato un'assorbanza solare pari al 95.1% e un'emissività termica, a 550 °C, pari al 9.5%. È stato quindi realizzato un prototipo di coating per tubo ricevitore evacuato di impianti CSP/CST operanti alla temperatura massima di 550 °C. In merito agli elementi del pregresso considerati riutilizzabili, come già evidenziato, il prototipo di sistema di accumulo termico di tipo termoclino realizzato nel precedente triennio verrà riutilizzato, mediante

opportune modifiche ed up-grade, nelle LA1.15 e LA1.16 di Progetto nel nuovo triennio. Inoltre, con riferimento alle attività di ricerca sul sistema micro-PTC proposto da UniFI, nel precedente triennio sono stati condotti studi e test sperimentali (LA1.4, LA1.5 e LA1.6) che hanno consentito di individuare diverse possibili azioni di sviluppo. Nel nuovo triennio, nell'ambito della LA1.14, non è previsto lo sviluppo e realizzazione di un sistema micro-PTC "nuovo" in senso assoluto in quanto il suo layout nella sostanza non cambierà, dato che le scelte progettuali di massima effettuate si sono dimostrate adatte allo scopo. Pertanto, sulla base delle risultanze emerse nel precedente triennio (che saranno ulteriormente approfondite nella LA1.14), gli interventi previsti sono essenzialmente legati ai miglioramenti delle singole parti del micro-PTC, quali ad esempio tubo ricevitore, sistema di inseguimento, connessione piping e concentratore parabolico. I miglioramenti che saranno realizzati, compatibilmente con il budget e la disponibilità di nuovi materiali sul mercato di riferimento, consentiranno di rendere disponibile un modulo prototipale in "versione up-grade" del micro-PTC di UniFI, ingegnerizzato e dotato, tra l'altro, di nuovi tubi ricevitori ad alta efficienza. Infine, la linea di attività LA1.13 del presente Progetto del triennio 2025-2027 prevede la messa a punto di processi di sputtering per la fabbricazione di prototipi di tubi assorbitori per il sistema micro-PTC di UniFI. Tale linea prende spunto dai risultati ottenuti nel precedente triennio di Progetto in cui ENEA si è occupata dello sviluppo dei materiali e dei relativi processi di deposizione realizzando, in forma di prototipo, un coating innovativo a elevate prestazioni fototermiche (assorbanza solare pari a 96.13% ed emissività termica, a 350 °C, pari a 7.12%) e ad alta stabilità (vita utile di almeno 25 anni per impiego fino a 350 °C in vuoto), idoneo per il sistema micro-PTC di UniFI. L'elemento di riferimento del progresso è rappresentato dalla proprietà fototermiche del prototipo di coating rispetto alle quali si cercherà di realizzare, nell'ambito del triennio 2025-2027, n° 24 spezzoni (lunghezza di circa 50 cm) di prototipi di tubi assorbitori il cui coating dovrà presentare prestazioni fototermiche quanto più prossime possibili rispetto a quelle del coating di riferimento sviluppato nell'ambito del precedente triennio di Progetto. Gli spezzoni di prototipi di tubi assorbitori saranno tagliati e saldati testa-testa (4 alla volta) e, quindi, assemblati e incapsulati sottovuoto per realizzare n° 6 tubi ricevitori (di lunghezza 1800 mm) per il prototipo di micro-PTC di UniFI in "versione up-grade".

- Per la linea di ricerca sull'"analisi delle potenzialità degli impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER per la decarbonizzazione dell'industria", si evidenzia che, nell'ambito della LA1.19 del precedente triennio, sono stati sviluppati modelli per campi eolici, cicli ORC e cicli vapore (di piccola e grande taglia) da utilizzare nel codice di ottimizzazione AES-OPT, un codice precedentemente sviluppato da PoliMI e basato su un modello matematico di tipo lineare misto intero (MILP). Il codice AES-OPT ha la peculiarità di ottimizzare il progetto di sistemi energetici integrati, quali microreti e virtual power plants, considerando sia le variabili di progetto (scelta energy technologies/componenti e ottimizzazione della taglia) che quelle operative (on/off e carichi per una serie di periodi rappresentativi/tipo di funzionamento). Tale codice e tali modelli sono stati utilizzati per studiare il design ottimale di impianti ibridi CSP-PV-Eolici in grado di soddisfare frazioni via via crescenti del carico elettrico imposto. Il carico elettrico imposto è stato ottenuto riscaldando la domanda elettrica nazionale su un picco di 50 MW. L'utilizzo di tutte e tre le tecnologie combinate in un unico impianto ibrido garantisce il minore LCOE e permette di ottenere livelli di dispacciabilità elevati (>95%), superiori rispetto agli impianti standalone non ibridizzati CSP o PV o Eolici, in grado di raggiungere rispettivamente livelli di dispacciabilità del 50%, 40% e 60%. La possibilità di integrare nell'impianto ibrido un riscaldatore elettrico che utilizzi l'elettricità in eccesso da PV ed Eolico convertendola in calore da accumulare nel sistema di accumulo dell'impianto CSP garantisce un ulteriore grado di flessibilità dell'impianto, riducendo ulteriormente l'LCOE, in particolare per livelli di dispacciabilità elevati. Le prestazioni degli impianti ibridi sono state, inoltre, ottimizzate considerando la possibilità di tali impianti di operare come UVAM (Unità Virtuali Abilitate Miste) / VPP (Virtual Power Plant) sul mercato elettrico del giorno prima (MGP) e sul mercato dei servizi di dispacciamento (MSD), con la funzione obiettivo della massimizzazione dei profitti. Nel caso di partecipazione al solo MGP non risulta conveniente installare alcuna tipologia di impianto, mentre applicando moltiplicatori di prezzo pari a 2 viene installato un impianto di tipo ibrido PV-Eolico e solo aumentando il moltiplicatore pari a 4 viene installato un impianto ibrido CSP-PV-Eolico. Nel caso in cui nell'ottimizzazione si imponga invece la soddisfazione completa della domanda dell'MSD, l'impianto CSP-PV-Eolico con riscaldatore elettrico ed accumulo termico ed elettrico risulta la migliore opzione, sebbene conseguendo un NPV negativo (-110 M€), ma decisamente migliore rispetto ad un impianto ibrido ottimizzato PV-Eolico con solo accumulo elettrico (-333 M€). Si sono infine valutate le prestazioni di un ipotetico impianto ibrido operante sull'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 del gas naturale ed in funzione del carico residuo. Tale modello è stato calibrato sui dati storici del prezzo dell'elettricità sull'MGP dal 2015 al 2021 (2020 escluso), mentre la domanda elettrica è stata riscaldata secondo le previsioni di crescita del consumo elettrico nazionale ed 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 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 livelli di dispacciabilità del 75%, ottenuto grazie alla riduzione prevista dei costi delle diverse tecnologie. Come dichiarato in precedenza, il codice di ottimizzazione AES-OPT ed i modelli dei componenti dell'impianto (PV, turbine eoliche, campo specchi, ciclo vapore, ciclo ORC, accumuli termici, ecc.) così come la modellizzazione dei mercati elettrici MGP e MSD saranno riutilizzati anche nel nuovo triennio di Progetto.

- La linea di ricerca sullo "studio concettuale dell'utilizzazione di calore solare da impianti a concentrazione per la valorizzazione di matrici organiche residuali mediante processi pirolitici e coproduzione di elettricità", risultando completamente nuova, non ha riscontri in analoghe attività del precedente triennio.

Attività di "gestione del Progetto e di comunicazione e disseminazione dei risultati" - L'attività di gestione del Progetto che, come già

detto, non prevedeva specifiche LA nel triennio 2022-2024, è stata efficacemente condotta nel precedente triennio applicando il “Piano di Coordinamento” e ha consentito di raggiungere i seguenti obiettivi:

- le criticità riscontrate nelle attività di ricerca sono state superate;
- i risultati e i prodotti previsti dal capitolato di Progetto sono stati ottenuti;
- nel complesso, si sono verificati limitati scostamenti economici tra rendiconto e preventivo, con modifiche compensative alla ripartizione economica delle voci di costo contenute nei limiti di una buona e corretta gestione del Progetto e, comunque, debitamente motivate.

L'attività di comunicazione disseminazione è stata realizzata nel precedente triennio di Progetto mediante:

- partecipazione a n° 7 conferenze (tra cui le “SolarPACES Conference” 2022, 2023 e 2024, quest'ultima tenuta in Italia e a cui il Progetto ha aderito in modo molto rilevante);
- partecipazione a n° 8 workshop, di cui n° 3 organizzati da ENEA;
- organizzazione di n° 2 eventi di disseminazione, previsti dal capitolato di Progetto, a cui hanno aderito rappresentanti degli stakeholder nazionali e dei Ministeri competenti;
- partecipazione a n° 7 meeting di comitati internazionali di riferimento del settore, tra cui n° 6 meeting del comitato esecutivo del “TCP IEA SolarPACES”;
- partecipazione a n° 3 eventi divulgativi aperti ai cittadini;
- organizzazione di n° 2 meeting di Progetto;
- pubblicazione di n° 9 articoli su riviste scientifiche internazionali indicizzate e di n° 2 articoli su atti di conferenza internazionale;
- sottomissione di ulteriori n° 2 articoli per la pubblicazione su riviste scientifiche internazionali indicizzate e di n° 2 articoli per la pubblicazione su atti di conferenza internazionale;
- aggiornamento della sezione dedicata alla RdS del sito web ENEA;
- emissione di n° 26 report specifici per le diverse LA del Progetto, da pubblicare nella suddetta sezione RdS del sito web ENEA.

Le modalità di realizzazione dell'attività di comunicazione disseminazione sopra riportate hanno consentito di raggiungere, al termine del triennio 2022-2024 di Progetto, i seguenti obiettivi:

- è stata data buona visibilità al Progetto e ne è stata pubblicizzata la fonte di finanziamento;
- è stata effettuata la disseminazione dei risultati della ricerca di Progetto nell'ambito della comunità scientifica internazionale;
- è stata curata la condivisione di informazioni su attività e risultati della ricerca tra il personale (ENEA e delle Università co-beneficiarie) che lavora al Progetto;
- 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 (IEA, EERA, ESTELA) e con programmi e progetti internazionali (TCP IEA SolarPACES, EERA JP CSP, ERANET, SUPEERA e SFERA III), anche partecipando a comitati e gruppi di lavoro specifici (es. ExCo TCP IEA SolarPACES, SET Plan CSP/CST IWG);
- è stato curato il costante aggiornamento sulle problematiche attuali e sulle nuove esigenze connesse all'evoluzione delle tecnologie CSP/CST 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) e alle problematiche che ostacolano una più ampia diffusione delle tecnologie CSP/CST nel Paese;
- è stata consolidata la 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 di disseminazione promossi da ENEA nell'ambito del Progetto.

In merito agli elementi dell'attività di project management del precedente triennio 2022-2024, sono considerati riutilizzabili nel nuovo triennio di Progetto i seguenti “strumenti” di gestione:

- “Piano di Coordinamento”, integrato nel capitolato di Progetto;
- istituzione di un “Comitato di Coordinamento” (CdC) composto da: capoprogetto, referenti delle linee di ricerca, referenti dell'ENEA e delle Università;
- riunioni “ordinarie” del CdC programmate nei mesi M1, M12, M18, M27 e M36;
- riunioni “straordinarie” del CdC in caso di occorrenza (i) di rischi per cui le azioni di mitigazione / soluzioni previste nel “Piano di Rischio” del Progetto non risultassero efficaci ovvero (ii) di rischi non preventivabili e/o non preventivati;
- riunioni tra capoprogetto e referenti delle linee di ricerca con cadenza almeno bimestrale, per un efficace e continuo monitoraggio dell'avanzamento delle attività di ricerca e delle azioni di spesa.

In merito agli elementi dell'attività di dissemination del precedente triennio 2022-2024, sono considerati riutilizzabili nel nuovo triennio di Progetto i “canali” di comunicazione e disseminazione, con adozione delle seguenti modalità di realizzazione:

- aggiornamento della sezione dedicata alla Ricerca di Sistema elettrico del sito web dell'ENEA;
- partecipazione ad almeno 6 tra workshop, congressi e conferenze nazionali e internazionali (tra cui le “SolarPACES Conference” 2025, 2026 e 2027);
- organizzazione di almeno un evento di disseminazione (previsto a fine Progetto) a cui saranno invitati anche gli stakeholder nazionali e

rappresentanti dei Ministeri competenti, per presentare i risultati ottenuti e i prodotti sviluppati nel Progetto;

- sottomissione di almeno 8 articoli per la pubblicazione su riviste scientifiche nazionali/internazionali indicizzate e atti di congresso/conferenza.

### c) Obiettivi scientifici e tecnologici e progressi attesi rispetto allo stato dell'arte

Di seguito si riportano gli obiettivi, scientifici e tecnologici, e i progressi attesi rispetto allo stato dell'arte specifici per ogni linea di ricerca del Progetto 1.9 "Solare Termodinamico", inserita nell'ambito della tematica scientifico-applicativa di riferimento.

Tematica "sistemi di accumulo termico per impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER e per la fornitura di energia su base stagionale":

- Con riferimento alla linea di ricerca sulla "comparazione sperimentale tra sistemi di accumulo termico, di tipo termocline a sali fusi, per l'ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER", la realizzazione e successiva sperimentazione di un nuovo prototipo di serbatoio di stoccaggio di tipo termocline a sali fusi ibridizzato con altre tecnologie FER, che prevede l'eliminazione di un passaggio intermedio di conversione dell'energia da elettrica a termica (riscaldamento tramite resistenze elettriche, alimentate da PV, direttamente immerse nei sali in sostituzione del riscaldamento tramite caldaia elettrica, alimentata da PV, dell'olio diatermico che circola all'interno di uno scambiatore "di carica" immerso nei sali), si pone l'obiettivo di incrementare l'efficienza globale del sistema e di ridurre i costi capitali di un componente fondamentale dei sistemi ibridi, quale è il sistema di accumulo termico integrato con la tecnologia di ibridizzazione.
- Per la linea di ricerca sui "sistemi di riscaldamento elettrico a microonde dei sali fusi per l'ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER", si intende (i) colmare la lacuna scientifica relativa alle proprietà dielettriche dei sali fusi, sia binari che ternari, emersa dallo stato dell'arte, e (ii) convalidare su scala di laboratorio (TRL 4) la tecnologia di riscaldamento dei sali fusi mediante microonde, partendo dall'esperienza conseguita sul dispositivo sperimentale "proof of concept" (TRL 3) realizzato nell'ambito del precedente triennio della RdS. In particolare, si intende dimostrare la fattibilità tecnologica dell'utilizzo del riscaldamento elettrico dei sali fusi con microonde in serbatoi di accumulo, operando il dispositivo sperimentale in condizioni di massima efficienza attraverso un sistema sensoristico e di controllo sviluppato ad hoc.
- Per la linea di ricerca sui "sistemi di accumulo termico stagionali, di tipo termo-chimico a zeoliti, alimentabili da CST", le attività rappresentano il naturale prosieguo di quelle svolte nel precedente triennio e si propongono di esplorare le potenzialità della tecnologia di accumulo a zeoliti in applicazioni che richiedono un uso stagionale del calore immagazzinato, con conseguente valutazione dei trend prestazionali ottenibili su medio-lungo periodo e a diverse temperature iniziali di carica (comprese tra 90 e 250 °C).

Tematica "materiali e dispositivi per il monitoraggio degli impianti CSP/CST e l'innovazione dei processi O&M":

- Con riferimento alla linea di ricerca sui "sensori di sporcamiento/failure degli specchi per la digitalizzazione del campo solare degli impianti CSP/CST", ci si propone l'obiettivo di individuare, fabbricare ed implementare su una scala intermedia (dimensioni fino a 100x300 mm) le soluzioni sensoristiche a base di nitruri piezoelettrici selezionate e applicate in prototipi di scala da laboratorio nel corso del precedente triennio, e di sviluppare nuovi dispositivi che sfruttino le proprietà ottiche (ad es. fotoluminescenza dei materiali), al fine di agevolare l'integrazione dei sensori nelle tecniche di imaging digitale tuttora adoperate in alcuni impianti solari per diagnosticare il livello di sporcamiento degli specchi. In particolare, per quanto riguarda le fasi di nitruro di alluminio piezoelettriche, saranno eseguiti esperimenti volti a massimizzare il coefficiente  $d_{33}$  del materiale costitutivo e sarà realizzato un prototipo di area sensorizzata di maggiori dimensioni (fino a 100x300 mm), idonea al monitoraggio delle polveri ivi deposte. Per quanto riguarda i sensori ottici, l'obiettivo è costruire sullo specchio un pattern riconoscibile a distanza (e quindi interrogabile), modulando la quantità di specie luminescenti nella formulazione, che potrà essere sia di natura polimerica (ad es. vernici fotoluminescenti) sia di natura inorganica (fasi piezofotoniche). Le soluzioni sensoristiche saranno integrabili nei rivestimenti autopulenti, ma non si esclude di sviluppare soluzioni più generiche idonee a specchi solari commerciali di diversa architettura. In tutti i casi si prevede una sperimentazione in ambiente outdoor presso l'impianto sperimentale Fresnel "ENEA-SHIP" del C.R. ENEA di Casaccia, atta ad individuare schemi di possibile integrazione con ICT.
- Per la linea di ricerca sulla "diagnosi a ultrasuoni per la rilevazione di occlusioni solide nel piping di impianti CSP/CST utilizzando miscele di sali fusi come fluido termovettore", si vogliono proseguire gli studi intrapresi nel precedente triennio con l'obiettivo di sviluppare, realizzare e convalidare in laboratorio un dispositivo di diagnosi a ultrasuoni, progettato dal co-beneficiario UniNA, capace di inviare impulsi e rilevare i segnali riflessi per individuare discontinuità nel fluido termovettore. Questo strumento sarà testato per identificare l'avvio e monitorare la progressione della solidificazione delle miscele di sali, permettendo così di localizzare la formazione e la posizione di eventuali occlusioni solide. Il dispositivo verrà installato presso il circuito sperimentale "MoSE" (Molten Salt Experiments) del C.R. di Casaccia che è una facility di test in grado di replicare le condizioni operative reali di un impianto CSP/CST che utilizza i sali fusi come fluido termovettore. Lo sviluppo e la convalida su scala di laboratorio di questo dispositivo di diagnosi potrebbe migliorare significativamente la gestione operativa degli impianti CSP/CST a sali fusi, con particolare riferimento a quelli a collettori lineari (PTC e LFC), rendendo la gestione di tali tecnologie più "smart" e migliorando, parallelamente, la loro bancabilità e attrattività per l'integrazione nel sistema energetico nazionale.

Tematica "integrazione degli impianti CSP/CST in sistemi di poligenerazione distribuita asserviti a utenze industriali e civili":

- Con riferimento alla linea di ricerca sui "sistemi di cogenerazione distribuita, alimentati da impianti CSP/CST ibridizzati con PV, asserviti a utenze industriali e civili locali", la realizzazione e successiva sperimentazione di un dimostratore tecnologico di sistema di cogenerazione distribuita di elettricità e calore, alimentato da impianti CSP/CST e PV, si pone l'obiettivo di studiare ed ottimizzare

l'integrazione di questo tipo di impianti ibridi in contesti civili ed industriali. In merito all'up-grade del prototipo di sistema micro-PTC proposto dal co-beneficiario UniFI, che sarà sperimentato inserendolo nel dimostratore tecnologico, ci si aspetta di compiere uno step significativo in termini di incremento dell'efficienza della conversione "radiazione solare/calore" del sistema anche grazie alle prestazioni di tubi ricevitori dotati del coating solare sviluppato da ENEA, notevolmente più elevate rispetto a quelle del componente attualmente in dotazione al micro-PTC. Peraltro, si evidenzia che gli studi sui materiali e sistemi di costruzione dei tubi ricevitori sono finalizzati all'estensione del range di utilizzo del prototipo di micro-PTC fino a una temperatura massima dell'ordine dei 350-400 °C. Inoltre, mediante l'uso di materiali più performanti e il miglioramento dei sistemi di inseguimento e "interception-factor" si vuole ottenere un innalzamento dell'efficienza ottica e, infine, la riprogettazione del collettore micro-PTC e dei suoi elementi strutturali saranno propedeutici per il miglioramento del rapporto "superficie occupata / superficie capante" (ovvero "area lorda / area netta").

- Per la linea di ricerca sull'"analisi delle potenzialità degli impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER per la decarbonizzazione dell'industria", rispetto alle attività di ricerca del precedente triennio, focalizzate su impianti CSP ibridizzati per la sola produzione di potenza elettrica, si evidenziano i seguenti aspetti innovativi: (i) l'ottimizzazione del progetto di sistemi CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER per la cogenerazione di energia elettrica e termica a servizio di utenze industriali; (ii) l'ottimizzazione del progetto di sistemi CSP/CST ibridizzati cogenerativi con l'utilizzo di tool avanzati che tengono conto in modo rigoroso della gestione oraria e dei costi; (iii) la valutazione dei settori industriali più promettenti per l'utilizzo di sistemi ibridizzati CSP/CST e stime preliminari dei costi e della decarbonizzazione raggiungibile.
- Per la linea di ricerca sullo "studio concettuale dell'utilizzazione di calore solare da impianti a concentrazione per la valorizzazione di matrici organiche residuali mediante processi pirolitici e coproduzione di elettricità", sfruttando la consolidata esperienza del co-beneficiario UniPA nello studio, sia sperimentale che concettuale, di processi chimici ed elettrochimici anche assistiti da calore solare per la preparazione di combustibili e composti chimici, si proseguirà lo studio, iniziato nel triennio 2019-2021 della RdS, inerente all'individuazione di possibili strategie di accoppiamento di impianti solari a concentrazione con processi chimici endotermici, per conseguire un effettivo progresso rispetto allo stato dell'arte precedentemente descritto. Le analisi di fattibilità, infatti, saranno volte ad individuare strategie e parametri operativi ottimali per integrare, in modo economicamente sostenibile, il calore solare prodotto da impianti CST nei processi pirolitici.

#### **d) Eventuali collegamenti con altri progetti relativamente alle attività previste nel progetto**

Alcune delle attività di ricerca proposte nel Progetto 1.9 "Solare Termodinamico" si basano sull'esperienza maturata da ENEA e dai co-beneficiari nell'ambito di progetti, nazionali e internazionali, e si pongono l'obiettivo di accrescere le conoscenze e le competenze acquisite, nonché di sviluppare soluzioni tecnologiche e di sistema avanzate d'interesse per la filiera produttiva nazionale di settore e di indotto.

I progetti di ricerca, realizzati o in corso di realizzazione, di maggior interesse ai fini del Progetto sono di seguito riportati.

- Il progetto "SolarGrid" (anni 2020-2023, finanziato dal PNR 2015-2020) ha previsto l'up-grade di componenti e tecnologie per sistemi CSP e PV (specificamente, PV a concentrazione) con accumulo, per la cogenerazione di elettricità e calore, in grado di migliorare le prestazioni energetiche, la competitività economica e l'integrazione di tali sistemi nelle reti intelligenti. In particolare, nell'ambito del progetto SolarGrid sono stati sviluppati nuovi coating solari per tubi ricevitori operanti in aria ad alta temperatura e soluzioni per superfici riflettenti autopulenti.
- Il progetto "EuroPatMoS" (anni 2020-2023, finanziato nell'ambito della prima call EU CSP ERANET) ha previsto attività di studio, test e valutazione di componenti critici e procedure di controllo per impianti CSP con tecnologia PTC a sali fusi.
- Il progetto "WOW-SUN" (iniziato nel 2021 e chiuso prima del termine a causa di problematiche di tipo amministrativo, finanziato dal PO-FESR Sicilia 2014-2020) verteva sull'integrazione di un impianto PV con uno CSP/CST, sfruttando un sistema di accumulo termico a sali fusi di tipo termoclino, alimentabile in modo flessibile sia con energia elettrica (fondamentalmente da PV) che termica (da CSP/CST), come soluzione vantaggiosa per produrre elettricità/calore rinnovabile on-demand.
- Nell'ambito del progetto "EU-SFERA-III" (anni 2019-2023, finanziato da Horizon 2020), finalizzato a rafforzare la sostenibilità delle attività delle infrastrutture di ricerca europee sul CSP avanzato, sono state sviluppate, tra l'altro, procedure per la qualifica delle prestazioni di collettori solari e di materiali e componenti di sistemi di accumulo termico.
- Il progetto "ORC-PLUS" (anni 2015-2019, finanziato da Horizon 2020 - LCE-2014) era focalizzato sullo sviluppo di un innovativo sistema di accumulo termico, ottimizzato per impianti CSP di piccola-media taglia, di tipo termoclino a liquido confinato ovvero di tipo termoclino a letto impaccato.
- Il progetto europeo "MATS" (anni 2011-2018, finanziato dal FP7) era finalizzato a sviluppare e realizzare un impianto solare a concentrazione di tipo PTC poligenerativo, con fluido termovettore costituito da "Solar Salt" e sistema di accumulo termico diretto di tipo termoclino con generatore di vapore integrato.
- Nell'ambito del progetto europeo "STS-Med" (anni 2013-2016, finanziato dal programma ENPI CBC Med) sono stati sviluppati e realizzati prototipi di sistemi solari a concentrazione di piccola taglia poligenerativi ovvero capaci di fornire energia elettrica, termica e frigorifera per molteplici usi richiesti, in particolare, da edifici pubblici siti in contesti urbani dell'area del Mediterraneo.
- Nell'ambito del progetto "RESLAG" (anni 2015-2019, finanziato da Horizon 2020 - WASTE-2014) è stato studiato il riutilizzo delle scorie prodotte dall'industria siderurgica come materiale di riempimento nei sistemi di accumulo di calore di tipo termoclino a letto

impaccato; il progetto pilota del serbatoio termoclino RESLAG è stato realizzato presso il C.R. ENEA di Casaccia.

- Nel progetto “IN-POWER” (anni 2017-2021, finanziato da Horizon 2020) ENEA ha contribuito, tra l’altro, al processo di selezione, testing e validazione di nuovi fluidi termovettori e di materiali di riferimento per componenti e sottosistemi di impianti CSP e all’analisi del loro impatto sul LCOE.
- Nel progetto “SUNSTORE” (anni 2017-2021, finanziato dal bando di tipo B RdS - 2014) è stato studiato da un punto di vista modellistico ed implementato, sia a livello di “mock-up” sia a livello di prototipo, un accumulo a zeoliti alimentato da calore generato da sistemi solari a bassa temperatura ( $T < 150\text{ °C}$ ) per applicazioni di solar-cooling e calore di processo.
- Il progetto “HEXERGY - Pompa di calore innovativa per il recupero di cascami termici in applicazioni industriali a media e alta temperatura” (anni 2023-2026, finanziato dal bando di tipo B RdS - 2020) prevede la realizzazione di un sistema basato sulle tecnologie delle zeoliti per il recupero di cascami termici per applicazioni industriali a media temperatura.
- Il progetto “Model Intercomparison and Case Studies Concerning Hybrid CSP-TES/PV-Battery Systems” (anni 2023-2024, finanziato da SolarPACES nell’ambito del Task I, coordinato da NREL e che vede la partecipazione di POLIMI, DLR e KTH) prevede il confronto di codici ed approcci per l’ottimizzazione di sistemi ibridi CSP-TES/PV-BESS tra diverse istituzioni di ricerca.
- Il progetto “NEST - Network 4 Energy Sustainable Transition” (anni 2022-2025, finanziato dall’Unione Europea nell’ambito di Next Generation EU, a valere sulle risorse della Missione 4 / Componente 2 / Investimento 1.3 del PNRR - Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza, committente MUR) prevede, all’interno dello “Spoke 1: SOLAR: PV, CSP & CST”, il “WP1.4: New concept for CSP/CST systems” che verte, tra l’altro, sullo sviluppo di componenti e sistemi CSP/CST per l’integrazione con processi industriali e in ambiente civile, di soluzioni avanzate per sistemi di accumulo termico e per l’ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER, di nuovi fluidi termovettori e materiali per l’accumulo termico, di nuovi coating assorbitori solari selettivi per tubi ricevitori d’impianti CSP/CST a collettori lineari.
- Il progetto “ReFuel - Strategies for the advanced hydrothermal liquefaction of recalcitrant bioresources to renewable fuel” (Settembre 2023 - Agosto 2025, finanziato dall’UE nell’ambito di Next Generation EU, a valere sulle risorse della M4 / C2 / I1.1 del PNRR - PRIN 2022, committente MUR) prevede, tra l’altro, l’acquisizione di una comprensione più approfondita dell’effetto dei pretrattamenti acidi e alcalini della frazione organica dei rifiuti solidi urbani (FORSU) sulla loro recalcitranza, sulla mitigazione della variabilità annuale e sul miglioramento della resa, con l’obiettivo di ampliare la base di conoscenze per uno sfruttamento efficiente delle biorisorse di interesse per la produzione di combustibili rinnovabili mediante liquefazione idrotermica (HTL).
- Nel progetto “MARTA - Monitoraggio e gestione Avanzata in Rete di impianti fotovoltaici” (anni 2023-2025, Bandi PON Industria) focalizzato su impianti PV a terra di medie-grandi dimensioni, ENEA ha sviluppato componenti per l’analisi dati per garantire funzionalità di forecasting e anomaly detection a servizio delle attività di O&M.
- Il progetto “SALTOpower - European facility on Molten SALT technologies TO power and energy system applications” (anni 2023-2025, progetto HORIZON) intende migliorare l’eccellenza scientifica e la capacità di innovazione, a livello europeo, sugli impianti CSP a sali fusi, inclusi sistemi di storage termico ibridizzati.
- Il progetto “CST4ALL - Support to the activities of the ETIPs and technology areas of the SET Plan (anni 2022-2025, progetto HORIZON) analizza le possibili politiche di sviluppo del CST in Europa in maniera allineata con le attuali priorità dell’UE (ad esempio, smart sector integration, Fit for 55 e CETP - Clean Energy Transition Partnership) e con le strategie energetiche specifiche degli Stati membri interessati, e mira a fornire soluzioni a molte delle sfide più urgenti legate alla decarbonizzazione e alla sicurezza energetica. In merito alla sinergia e/o ai collegamenti con i suddetti progetti di ricerca, si riporta di seguito la situazione specifica per ognuna delle 3 tematiche scientifico-applicative in cui si sviluppa il Progetto 1.9 “Solare Termodinamico”.  
 Tematica “sistemi di accumulo termico per impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER e per la fornitura di energia su base stagionale”:
- Con riferimento alla linea di ricerca sulla “comparazione sperimentale tra sistemi di accumulo termico, di tipo termoclino a sali fusi, per l’ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER”, verrà valorizzata l’esperienza maturata da ENEA nella realizzazione di prototipi su scala ridotta nell’ambito dei progetti STS-Med, ORC-PLUS e RESLAG; in particolare, potranno tornare utili le conoscenze acquisite nel Progetto ORC-PLUS in cui è stato studiato un sistema di accumulo termico, di tipo termoclino a sali fusi, alimentato esclusivamente da CSP.
- Per la linea di ricerca sui “sistemi di riscaldamento elettrico a microonde dei sali fusi per l’ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER”, ENEA ha avviato, nell’ambito del progetto WOW-SUN, un’attività di studio e progettazione di un sistema di accumulo termoclino a sali fusi basso-fondenti, dotato di resistenze elettriche immerse per la conversione di elettricità in calore, destinato ad immagazzinare sia energia termica da CSP/CST, sia elettricità in eccesso da fonti rinnovabili; l’esperienza maturata da ENEA ha consentito di affrontare, da un punto di vista teorico, gli aspetti tecnologici legati all’utilizzo di resistori a contatto con i sali fusi, evidenziando la limitazione nella potenza massima trasferibile al sistema di accumulo in corrispondenza di alte temperature operative, prossime al limite massimo ammissibile, che per la miscela binaria “Solar Salt” è pari a  $550\text{ °C}$ .
- Per la linea di ricerca sui “sistemi di accumulo termico stagionali, di tipo termo-chimico a zeoliti, alimentabili da CST”, saranno studiate e sviluppate soluzioni impiantistiche più evolute ed efficienti rispetto a quelle implementate nel progetto SUNSTORE con l’obiettivo di mettere a punto un sistema di accumulo (operante nel range  $90 - 250\text{ °C}$ ) ottimizzato (i) sia dal punto di vista dell’applicazione stagionale, (ii) sia delle performance energetiche e (iii) sia, infine, della flessibilità di utilizzo concependolo in forma modulare (batteria termica) e

prevedendo la possibilità di utilizzare diversi fluidi termo-vettori (acqua e olio diatermico) per diversificarne il range di utilizzo sia lato utenza che lato produzione (CST o waste heat). La linea di ricerca in oggetto potrà beneficiare, inoltre, dell'esperienza che si sta maturando nel progetto HEXERGY.

Tematica "materiali e dispositivi per il monitoraggio degli impianti CSP/CST e l'innovazione dei processi O&M":

- Con riferimento alla linea di ricerca sui "sensori di sporco/failure degli specchi per la digitalizzazione del campo solare degli impianti CSP/CST", lo screening dei diversi rivestimenti autopulenti compatibili con specchi di architettura e localizzazione geografica varia, eseguito nel progetto SolarGrid, risulta utile e sinergico alle attività proposte in quanto preliminare alla scelta, definizione ed implementazione nel suddetto rivestimento di ulteriori proprietà, quali quelle diagnostiche dei livelli di sporco/failure. In tal senso, le attività proposte in ambito sensoristico si configurano come un'evoluzione rispetto alle attività di SolarGrid, prevedendo lo sviluppo di dispositivi sensori, sia integrati negli strati autopulenti che autonomi, idonei al monitoraggio dinamico del livello di prestazione sia del singolo specchio che dell'intero campo solare.
- Per la linea di ricerca sulla "diagnosi a ultrasuoni per la rilevazione di occlusioni solide nel piping di impianti CSP/CST utilizzando miscele di sali fusi come fluido termovettore", fatta eccezione per le già citate ricerche condotte nel precedente triennio della RdS dal co-beneficiario UniNA, non si segnalano altri progetti (realizzati o in corso di realizzazione) con attività collegate, direttamente o indirettamente, alle attività della linea di ricerca in oggetto.

Tematica "integrazione degli impianti CSP/CST in sistemi di poligenerazione distribuita asserviti a utenze industriali e civili":

- Con riferimento alla linea di ricerca sui "sistemi di cogenerazione distribuita, alimentati da impianti CSP/CST ibridizzati con PV, asserviti a utenze industriali e civili locali", potranno tornare utili le esperienze maturate e alcuni dei risultati conseguiti nell'ambito dei progetti europei MATS, ORC-PLUS, STS-Med, SALTPower e CST4ALL nei quali sono state studiate soluzioni di integrazione della fonte solare con combustibili fossili e configurazioni di impianto di tipo poligenerativo. Inoltre, il progetto MARTA fornisce una base esperienziale per lo sviluppo di algoritmi AI a servizio della digitalizzazione di impianti di produzione energetica, in questo caso a tecnologia PV. Infine, in merito alle attività di messa a punto di processi di sputtering per la fabbricazione di prototipi di tubi assorbitori (dotati del coating solare sviluppato da ENEA nel precedente triennio della RdS) per realizzare l'up-grade del sistema micro-PTC sviluppato da UniFI, quest'attività potrà beneficiare oltre che delle competenze di ENEA (consolidate da anni e di assoluto rilievo in ambito internazionale) nella R&S sui coating solari per tubi ricevitori e relativi processi di deposizione, anche dell'esperienza maturata nei recenti progetti SolarGrid e NEST, il secondo dei quali attualmente in corso di esecuzione.
- Per la linea di ricerca sull'"analisi delle potenzialità degli impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER per la decarbonizzazione dell'industria", PoliMI può beneficiare dell'esperienza maturata nei progetti "Model Intercomparison and Case Studies Concerning Hybrid CSP-TES/PV-Battery Systems" e "NEST", e in altri progetti di ricerca industriali, inerenti l'ottimizzazione del progetto di impianti ibridi per la fornitura di energia elettrica e termica a utenze civili ed industriali.
- Per la linea di ricerca sullo "studio concettuale dell'utilizzazione di calore solare da impianti a concentrazione per la valorizzazione di matrici organiche residuali mediante processi pirolitici e coproduzione di elettricità", UniPA ha partecipato a diversi progetti di ricerca, tra cui il progetto ReFuel, finanziati dall'Ateneo di Palermo, dal MUR (progetti PRIN), e dalla comunità europea (FP7 e Horizon 2020). I risultati di questi progetti hanno portato alla pubblicazione di numerosi articoli scientifici, su riviste indicizzate e atti di conferenze internazionali, e alla realizzazione di prototipi nei seguenti ambiti: (i) liquefazione idrotermica di microalghe e matrici residuali come i fanghi di depurazione delle acque; (ii) conversione catalitica di plastiche assistita da sali fusi a base di Zn; (iii) studio concettuale di scenari di accoppiamento di processi chimici industriali sia convenzionali che di bioraffineria con impianti solari a concentrazione.

## 2.5 Obiettivi e risultati

### a) Obiettivi finali del progetto

Il solare a concentrazione, termodinamico (Concentrated Solar Power, CSP) e termico (Concentrated Solar Thermal, CST), è una tecnologia di generazione di elettricità/calore che, accoppiata a efficienti accumuli termici (poco costosi e senza particolari limitazioni di capacità o durata), può svolgere un ruolo chiave nel supportare la penetrazione delle fonti energetiche rinnovabili (FER), sia nel contesto dell'integrazione energetica intelligente che nei settori industriale e civile, ai fini di una capillare decarbonizzazione dell'intero sistema energetico e produttivo nazionale. In tale ambito, il Progetto 1.9 "Solare Termodinamico" del PTR 2025-2027 della RdS si propone di rendere disponibili materiali, componenti, dispositivi, sistemi, soluzioni tecniche e metodologie avanzate (i) per l'efficace ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER, (ii) funzionali alla digitalizzazione degli impianti CSP/CST e (iii) per l'integrazione degli impianti CSP/CST con le reti energetiche e con utenze industriali e/o civili, sia in applicazioni di generazione e co-generazione centralizzata che distribuita. L'obiettivo ultimo è incrementare la dispacciabilità dell'energia (elettrica e termica) prodotta da fonte solare, aumentare la versatilità di utilizzo degli impianti CSP/CST e, in una prospettiva di medio periodo, ridurre il costo di generazione dell'energia mediante il miglioramento delle performance e la riduzione delle spese operative e di manutenzione (O&M). In particolare, il Progetto si propone di contribuire al raggiungimento del target di medio periodo stabilito nell'"Updated (2023) CSP/CST Implementation Plan (IP) dello Strategic Energy Technology (SET) Plan" per il costo livellato dell'elettricità (LCOE) prodotta da CSP, pari a meno di 10 c€/kWh nelle località dell'Europa meridionale entro il 2030, considerando condizioni di irraggiamento di riferimento di 2050 kWh/m<sup>2</sup>/anno. Di seguito si riportano gli obiettivi finali specifici per ogni linea di ricerca del Progetto, inserita nell'ambito della tematica

scientifico-applicativa di riferimento.

Tematica “sistemi di accumulo termico per impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER e per la fornitura di energia su base stagionale”:

- Con riferimento alla linea di ricerca sulla “comparazione sperimentale tra sistemi di accumulo termico, di tipo termoclino a sali fusi, per l'ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER”, recependo le indicazioni degli stakeholder del settore, l'obiettivo principale è migliorare la progettazione e le prestazioni degli impianti ibridi tra CSP/CST e altre tecnologie FER, con particolare ma non esclusivo riferimento agli impianti ibridi CSP + PV (altresi detti Integrated CSP and PV Hybrid Plant, ICHP), sia a livello di componenti che di integrazione di sistema. Un modo efficiente per combinare CSP/CST e PV è quello di utilizzare un riscaldatore elettrico che sfrutta l'elettricità in eccesso da PV per riscaldare i sali fusi dell'accumulo termico. Tuttavia, mentre i riscaldatori elettrici più piccoli sono già utilizzati in altri processi industriali, non è stato studiato a fondo un riscaldatore elettrico a basso costo e ad alte prestazioni adatto per le centrali solari ibride. La ricerca intende, quindi, sviluppare un sistema di riscaldamento idoneo all'applicazione in esame che sia scalabile anche per le grandi taglie, modulare e in grado di aumentare l'efficienza e la flessibilità del sistema di accumulo termico di un impianto ibrido CSP/CST + PV. La ricerca mira, in particolare, ad aumentare l'efficienza di conversione dell'energia, ridurre i tempi di carica/scarica, migliorare la gestione del sistema di accumulo di tipo termoclino a sali fusi e ridurre i costi capitali di un componente fondamentale dei sistemi ibridi, quale è l'accumulo termico integrato con la tecnologia di ibridizzazione. Al fine di convalidare la tecnologia in ambiente operativo, nell'ambito della linea di ricerca è prevista la realizzazione di un prototipo funzionale di sistema di accumulo termico, di tipo termoclino a sali fusi, collegato a un campo solare CSP/CST e dotato di resistenze elettriche corazzate immerse nei sali alimentabili da PV.
- Per la linea di ricerca sui “sistemi di riscaldamento elettrico a microonde dei sali fusi per l'ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER”, l'implementazione di un sistema di conversione elettro-termica ad alta efficienza e scalabilità, integrabile con accumuli termici a sali fusi, consentirebbe di assorbire in modo flessibile la produzione variabile di elettricità da fonti rinnovabili, sia a livello locale che di rete. Nell'ottica di una continuità con le attività svolte nel precedente triennio della RdS, si intende incrementare il grado di maturità tecnologica del sistema di riscaldamento elettrico a microonde per sali fusi, superando gli obiettivi precedentemente definiti.
- Per la linea di ricerca sui “sistemi di accumulo termico stagionali, di tipo termo-chimico a zeoliti, alimentabili da CST”, l'obiettivo principale che si intende perseguire è lo sviluppo di sistemi innovativi di accumulo termico, anche per uso stagionale, ad alta efficienza e dai costi competitivi che permettano di ottimizzare i processi di produzione e dispacciabilità dell'energia termica generata da sistemi CST a media temperatura ( $T < 250 \text{ }^\circ\text{C}$ ), il cui calore prodotto può essere utilizzato in applicazioni distribuite di piccola taglia per uso civile ed industriale. Allo stesso tempo tali sistemi di accumulo possono favorire il recupero e la valorizzazione di calore di scarto proveniente da processi termici convenzionali, contribuendo a ridurre il ricorso a combustibili fossili per la generazione di calore.

Tematica “materiali e dispositivi per il monitoraggio degli impianti CSP/CST e l'innovazione dei processi O&M”:

- Con riferimento alla linea di ricerca sui “sensori di sporco/failure degli specchi per la digitalizzazione del campo solare degli impianti CSP/CST”, l'obiettivo generale è sviluppare specchi solari sensorizzati in grado di fornire informazioni sul loro livello di funzionamento, sporco ed eventuale failure, consentendo una razionalizzazione degli interventi di ordinaria manutenzione ed un risparmio sui costi di gestione degli impianti. Attraverso l'inserimento negli strati esposti (sia autopulenti che non) di aree “interrogabili”, si intende muovere i passi necessari all'integrazione con ICT per la gestione da remoto del campo solare di impianti CSP. Ci si propone l'obiettivo di individuare, fabbricare ed implementare su una scala intermedia soluzioni sensoristiche in grado di massimizzare le prestazioni dei materiali selezionati nel precedente triennio e di definire nuove soluzioni che sfruttino le proprietà ottiche (ad es. fotoluminescenza dei materiali) per agevolare l'integrazione dei sensori nelle tecniche di imaging tuttora adoperate in alcuni impianti solari per diagnosticare la failure dei componenti. In particolare, per quanto riguarda le fasi piezoelettriche sarà realizzato un prototipo di superficie sensorizzata idonea al monitoraggio delle polveri ivi depositate e verranno valutate geometrie, dimensioni e prestazioni in ambiente outdoor, al duplice fine di raggiungere il migliore compromesso dimensioni/prestazioni e di “addestramento” del sensore agli habitat specifici. Per quanto riguarda i sensori ottici, l'obiettivo è costruire, in funzione della geometria del campo solare, un pattern riconoscibile a distanza (e quindi interrogabile) modulando le proprietà ottiche dei materiali sostitutivi (ad esempio la quantità di luminiferi nelle formulazioni). L'obiettivo di elezione è integrare componenti sensoristiche nei rivestimenti autopulenti, ma non si esclude di sviluppare soluzioni più generiche, idonee a specchi solari non rivestiti di autopulenti, quali ad esempio quelli montati nei campi solari CSP/CST già in funzione.
- Per la linea di ricerca sulla “diagnosi a ultrasuoni per la rilevazione di occlusioni solide nel piping di impianti CSP/CST utilizzando miscele di sali fusi come fluido termovettore”, gli obiettivi si incentrano sulla realizzazione e validazione in laboratorio di un dispositivo di diagnosi a ultrasuoni, ideato e progettato per identificare la presenza e la posizione delle occlusioni solide di sali nel piping degli impianti CSP/CST a sali fusi e, idealmente, per rilevarne l'incipiente formazione. La disponibilità di siffatto dispositivo tecnologico permetterà di eseguire diagnosi, atte a rilevare la presenza e individuare la posizione delle occlusioni di sali solidificati nel piping, senza la necessità di interrompere l'operatività o aprire le linee dell'impianto CSP/CST, evitando lunghi fermi impianto, e offrendo così vantaggi significativi in termini di continuità operativa e riduzione dei costi di manutenzione.

Tematica “integrazione degli impianti CSP/CST in sistemi di poligenerazione distribuita asserviti a utenze industriali e civili”:

- Con riferimento alla linea di ricerca sui “sistemi di cogenerazione distribuita, alimentati da impianti CSP/CST ibridizzati con PV, asserviti a utenze industriali e civili locali”, l'obbiettivo è quello di rispondere a uno dei problemi evidenziati negli incontri con gli stakeholder del settore, organizzati nell'ambito del Progetto 1.9 del precedente triennio della RdS, durante i quali è stato messo in rilievo

che una potenziale barriera alla diffusione del solare a concentrazione, termodinamico e termico, è rappresentata dalla mancanza di dimostratori tecnologici dove sia messa in evidenza la modularità della tecnologia CSP/CST e la possibilità di integrazione con sistemi PV. La realizzazione di attività di studio propedeutiche alla digitalizzazione degli impianti CSP/CST, come la sperimentazione di approcci AI al forecasting della produzione da impianti CSP/CST, rappresenta un significativo elemento di innovazione con impatti sia nell'integrazione (aumento della predicibilità della risorsa) sia nell'O&M avanzato. Per l'attività di up-grade del sistema micro-PTC proposto da UniFI che sarà dotato, in primis, di prototipi di tubi assorbitori provvisti del coating solare a elevate prestazioni fototermiche e alta stabilità appositamente sviluppato da ENEA nel precedente triennio, l'obiettivo è contribuire all'incremento della producibilità di calore di processo a media temperatura (fino a 350-400 °C) ed elettricità con cicli ORC, supportando la diffusione di questa nuova tecnologia solare a concentrazione che, risultando ben integrabile in strutture edilizie, si presenta come ideale per la cogenerazione distribuita in contesti civili e industriali.

- Per la linea di ricerca sull'"analisi delle potenzialità degli impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER per la decarbonizzazione dell'industria", i risultati ottenuti permetteranno di identificare le migliori tipologie di impianto ibrido adatte al contesto industriale italiano e di valutare quantitativamente la capacità di tali impianti di fornire energia elettrica e calore, nonché il costo dell'elettricità/calore per diversi livelli di decarbonizzazione. I risultati quantificheranno la convenienza economica in termini di net present value, pay back time, internal rate of return, indici utili per privati interessati ad investire in impianti CSP/CST ibridi.
- Per la linea di ricerca sullo "studio concettuale dell'utilizzazione di calore solare da impianti a concentrazione per la valorizzazione di matrici organiche residuali mediante processi pirolitici e coproduzione di elettricità", ci si propone di verificare la possibilità di utilizzare il calore generato dai sistemi solari a concentrazione per alimentare processi pirolitici energivori volti a valorizzare matrici organiche residuali. Si cercherà di classificare i processi pirolitici in base alla potenza termica richiesta (calore necessario per alimentare il processo) alle temperature di processo. Questa analisi sarà utilizzata per impostare la strategia di integrazione e adattamento dell'impianto solare più adeguata. Nello studio delle possibili soluzioni si cercherà di eseguire anche stime iniziali sulla sostenibilità economica degli accoppiamenti.

#### b) Principali risultati attesi/deliverable

Di seguito si riportano risultati attesi e prodotti/deliverable specifici per ogni linea di ricerca del Progetto 1.9 "Solare Termodinamico", inserita nell'ambito della tematica scientifico-applicativa di riferimento. In merito ai prodotti/deliverable, questi sono di varia tipologia a seconda delle diverse linee di ricerca. Dove non espressamente indicato (ad esempio nel caso della realizzazione di prodotti tangibili, quali prototipi e dispositivi), i risultati della ricerca saranno presentati all'interno di specifici report tecnici (in numero di almeno 1 per ogni LA di Progetto) che rientrano tra i prodotti/deliverable previsti.

Tematica "sistemi di accumulo termico per impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER e per la fornitura di energia su base stagionale":

- Con riferimento alla linea di ricerca sulla "comparazione sperimentale tra sistemi di accumulo termico, di tipo termocline a sali fusi, per l'ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER", i risultati attesi sono rappresentati dalla progettazione e realizzazione (in forma di prototipo) di un up-grade del sistema di accumulo termocline a sali fusi ibridizzato, realizzato nell'ambito del precedente triennio e asservito all'impianto sperimentale Fresnel "ENEA-SHIP" del C.R. ENEA di Casaccia, prevedendo, rispetto a questo, l'utilizzo di resistenze elettriche (alimentate da PV) direttamente immerse nei sali in sostituzione dello scambiatore di carica a olio diatermico (riscaldato da una caldaia elettrica alimentabile da PV). Sulla base dei risultati ottenuti dalla sperimentazione e dalla modellazione numerica del nuovo prototipo di sistema di accumulo termocline ibridizzato con resistenze elettriche immerse nei sali, verranno eseguite analisi prestazionali che consentiranno, tra l'altro, la comparazione con la precedente configurazione del sistema di accumulo.
- Per la linea di ricerca sui "sistemi di riscaldamento elettrico a microonde dei sali fusi per l'ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER", i risultati attesi includono (i) la valutazione sperimentale delle proprietà dielettriche dei sali fusi, sia delle miscele binarie che di quelle ternarie, al fine di estendere l'intervallo di temperatura operativa (da 190 °C a 550 °C) della tecnologia di riscaldamento a microonde dei sali fusi, e (ii) l'up-grade del dispositivo di accumulo termico sviluppato nel precedente triennio, al fine di poterlo testare in condizioni operative ottimali, rappresentative del funzionamento di un sistema reale.
- Per la linea di ricerca sui "sistemi di accumulo termico stagionali, di tipo termo-chimico a zeoliti, alimentabili da CST", si intende mettere a punto una facility di test per la caratterizzazione di accumuli termo-chimici ad adsorbimento, operanti fino a 250 °C, che consenta di valutare le potenzialità di utilizzo di tali tecnologie, anche in applicazioni stagionali, attraverso l'acquisizione di dati sperimentali in condizioni operative tali da consentire sia la validazione di modelli di previsione delle loro performance, sia la caratterizzazione delle dinamiche di accumulo e rilascio del calore durante le fasi di desorbimento/adsorbimento del vapore per diversi tempi di storage.

Tematica "materiali e dispositivi per il monitoraggio degli impianti CSP/CST e l'innovazione dei processi O&M":

- Con riferimento alla linea di ricerca sui "sensori di sporco/failure degli specchi per la digitalizzazione del campo solare degli impianti CSP/CST", perseguendo l'obiettivo di gestire da remoto il campo solare, il principale risultato sarà lo sviluppo di sensori per specchi solari compatibili con i rivestimenti autopulenti (piezoelettrici-nanocompositi). In particolare, si prevede il perfezionamento di un prototipo di dispositivo sensore piezoelettrico integrabile nello strato autopulente su una scala intermedia (dimensioni fino a 100x300 mm) (TRL 5-6). Inoltre, saranno sviluppati sensori ottici di luminescenza, che potranno essere applicati sia su specchi commerciali che su specchi autopulenti, e verranno proposti schemi di integrazione/operabilità di siffatti sensori con tecniche di imaging. Per questo tipo di

dispositivo, sarà prodotto un prototipo sulla scala laboratoriale (fino a 50x50 mm) “proof of concept” (TRL 3) di un sensore ottico di luminescenza e/o con proprietà ottiche idonee ad imaging, con l'obiettivo di poter inscrivere negli specchi pattern ottici riconoscibili a distanza e quindi interrogabili.

- Per la linea di ricerca sulla “diagnosi a ultrasuoni per la rilevazione di occlusioni solide nel piping di impianti CSP/CST utilizzando miscele di sali fusi come fluido termovettore”, il risultato principale consiste nella realizzazione del dispositivo di diagnosi a ultrasuoni (in forma di prototipo) e nella verifica in laboratorio dell'efficacia delle tecnologie a ultrasuoni per l'applicazione nell'ambito CSP/CST. Verrà inoltre sviluppato un protocollo per l'installazione e l'utilizzo del dispositivo, permettendo la diagnosi dello stato della miscela di sali, tanto in tubazioni rettilinee quanto in prossimità di parti del piping più soggette alle problematiche di solidificazione quali curve, valvole, restrizioni e, in generale, in componenti speciali.

Tematica “integrazione degli impianti CSP/CST in sistemi di poligenerazione distribuita asserviti a utenze industriali e civili”:

- Con riferimento alla linea di ricerca sui “sistemi di cogenerazione distribuita, alimentati da impianti CSP/CST ibridizzati con PV, asserviti a utenze industriali e civili locali”, i risultati attesi sono rappresentati dalla progettazione e realizzazione di un dimostratore tecnologico (a livello di prototipo) di sistema di cogenerazione distribuita di elettricità e calore di processo alimentato da impianti CSP/CST e PV. Il dimostratore sarà composto dal preesistente impianto sperimentale Fresnel “ENEA-SHIP” del C.R. ENEA di Casaccia, dal sistema di accumulo termocline a sali fusi alimentato sia dal campo solare a concentrazione di “ENEA-SHIP” che da un impianto PV, da un sistema ORC per la produzione di energia elettrica e sarà asservito ad un'utenza finale rappresentata dal sistema di illuminazione della stessa “zona impianto”. Sulla base delle attività di sperimentazione condotte sul dimostratore verranno eseguite analisi al fine di ottimizzare il funzionamento del sistema integrato. Inoltre, le metodologie adottate permetteranno lo sviluppo e l'analisi di risultati sperimentali circa la completezza della base sensoristica dislocata sugli impianti e l'integrazione di tecniche AI per il forecasting, realizzando un significativo passo verso la digitalizzazione degli impianti CSP/CST. Infine, in merito alle attività di messa a punto di processi di sputtering per la fabbricazione di prototipi di tubi assorbitori, da intendersi come tubi substrati di acciaio con sopra depositato il coating solare sviluppato nel precedente triennio, si vogliono fabbricare almeno n° 24 tubi assorbitori di lunghezza intono a 500 mm (limite di lunghezza dovuto al layout dell'impianto di sputtering “ENEA-2” del C.R. ENEA di Portici) da saldare testa-testa (4 alla volta), assemblare e incapsulare sottovuoto, al fine di fabbricare n° 6 tubi ricevitori di lunghezza 1800 mm. Di questi, n° 4 tubi ricevitori saranno installati su n° 1 modulo prototipale del sistema micro-PTC di UniFI (in “versione up-grade”, ingegnerizzato e realizzato nell'ambito del Progetto) e n° 2 tubi ricevitori costituiranno la scorta. Il risultato tecnico-scientifico atteso è che le prestazioni fototermiche del coating dei tubi assorbitori fabbricati siano prossime a quelle del prototipo sviluppato nel precedente triennio, indice di una messa a punto efficace dei processi di deposizione per sputtering implementati per la produzione in piccola serie dei tubi assorbitori. Inoltre, i risultati attesi della sperimentazione della nuova “versione up-grade” del modulo prototipale del sistema micro-PTC, condotta collegandolo al dimostratore tecnologico di sistema di cogenerazione distribuita, sono l'incremento dell'efficienza della conversione “radiazione solare/calore”, l'estensione del range di utilizzo fino a una temperatura massima dell'ordine dei 350-400 °C, l'innalzamento dell'efficienza ottica e il miglioramento del rapporto “superficie occupata / superficie capante” del sistema micro-PTC.

- Per la linea di ricerca sull'“analisi delle potenzialità degli impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER per la decarbonizzazione dell'industria”, i risultati principali consisteranno in: (i) insieme delle tipologie di industrie per le quali è possibile e vantaggiosa l'integrazione con sistemi CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER; (ii) insieme delle tecnologie solari a concentrazione adatte a produrre calore per le utenze industriali considerate; (iii) prestazioni tecnico-economiche-ambientali di impianti CSP/CST ibridizzati con altre FER per sistemi industriali cogenerativi di piccola e grande taglia, considerando l'effetto di fattori naturali ed antropici.

- Per la linea di ricerca sullo “studio concettuale dell'utilizzazione di calore solare da impianti a concentrazione per la valorizzazione di matrici organiche residuali mediante processi pirolitici e coproduzione di elettricità”, sarà messo a punto un metodo per integrare calore solare nel processo pirolitico di differenti tipologie di matrici residuali, in modo da associare ad elevate rese di bio-olio elevate frazioni di energia solare utilizzata.

## 2.6 Fattibilità tecnico-scientifica

### a) Fattibilità tecnico-scientifica

Il presente Progetto 1.9 “Solare Termodinamico” del PTR 2025-2027 della RdS si configura come un'iniziativa strategica volta a valorizzare il potenziale del solare a concentrazione, termodinamico (Concentrated Solar Power, CSP) e termico (Concentrated Solar Thermal, CST), nel contesto del processo di integrazione energetica intelligente finalizzata a una capillare decarbonizzazione dell'intero sistema energetico e produttivo nazionale.

Il Progetto (i cui obiettivi finali e principali risultati/deliverable sono stati discussi nelle sezioni precedenti) si avvale delle competenze, uniche in ambito nazionale e di assoluto rilievo in ambito internazionale, dell'affidatario ENEA sul tema di ricerca del “Solare Termodinamico”, competenze che saranno arricchite e completate da quelle messe a disposizione dai selezionati gruppi di ricerca delle Università co-beneficiarie maturate, peraltro, anche nel contesto dei precedenti trienni 2019-2021 e 2022-2024 della RdS.

Il Progetto prevede 1 work package (WP1) ed è organizzato in 3 tematiche scientifico-applicative, ognuna delle quali comprende diverse linee di ricerca che si sviluppano in linee di attività (LA) interconnesse e in carico all'affidatario ENEA e/o ai co-beneficiari.

La prima tematica inerente a “sistemi di accumulo termico per impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER e per la fornitura di

energia su base stagionale” prevede le seguenti 3 linee di ricerca:

- “comparazione sperimentale tra sistemi di accumulo termico, di tipo termoclino a sali fusi, per l'ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER”, costituita da 3 LA (LA1.1 e LA1.3, in carico a ENEA, e LA1.2, in carico a PoliTO);
- “sistemi di riscaldamento elettrico a microonde dei sali fusi per l'ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER”, costituita da 3 LA (LA1.4 e LA1.6, in carico a ENEA, e LA1.5, in carico a PoliTO);
- “sistemi di accumulo termico stagionali, di tipo termo-chimico a zeoliti, alimentabili da CST”, costituita da 2 LA (LA1.7 e LA1.8, in carico a ENEA).

La seconda tematica inerente a “materiali e dispositivi per il monitoraggio degli impianti CSP/CST e l'innovazione dei processi O&M” prevede le seguenti 2 linee di ricerca:

- “sensori di sporco/failure degli specchi per la digitalizzazione del campo solare degli impianti CSP/CST”, costituita da 2 LA (LA1.9 e LA1.10, in carico a ENEA);
- “diagnosi a ultrasuoni per la rilevazione di occlusioni solide nel piping di impianti CSP/CST utilizzando miscele di sali fusi come fluido termovettore”, costituita da 2 LA (LA1.11, in carico a UniNA, e LA1.12, in carico a ENEA).

La terza tematica inerente all’“integrazione degli impianti CSP/CST in sistemi di poligenerazione distribuita asserviti a utenze industriali e civili” prevede le seguenti 3 linee di ricerca:

- “sistemi di cogenerazione distribuita, alimentati da impianti CSP/CST ibridizzati con PV, asserviti a utenze industriali e civili locali”, costituita da 5 LA (LA1.13, LA1.15, LA1.16 e LA1.17, in carico a ENEA, e LA1.14, in carico a UniFI);
- “analisi delle potenzialità degli impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER per la decarbonizzazione dell'industria”, costituita da 1 LA (LA1.18, in carico a PoliMI);
- “studio concettuale dell'utilizzazione di calore solare da impianti a concentrazione per la valorizzazione di matrici organiche residuali mediante processi pirolitici e coproduzione di elettricità”, costituita da 1 LA (LA1.19, in carico a UniPA).

Infine, per le attività di “gestione del Progetto e di comunicazione e disseminazione dei risultati” sono previste 2 LA (LA1.20 e LA1.21, in carico a ENEA).

In conclusione, nel complesso il Progetto è strutturato in 1 WP, 3 tematiche scientifico-applicative, 8 linee di ricerca e 21 LA.

Il Progetto prevede un SAL intermedio (SAL1 - mese 18), nell'ambito del quale saranno rendicontate le LA espletate e portate a termine nei mesi 1-18 (primo periodo), e un SAL finale al termine del triennio (SAL2 - mese 36), nell'ambito del quale saranno rendicontate le rimanenti LA espletate e portate a termine nei mesi 19-36 (secondo periodo). In merito all'articolazione temporale delle diverse LA di cui è costituito il Progetto, le LA in carico all'affidatario ENEA interessano o il primo periodo del triennio (LA1.1, LA1.4, LA1.7, LA1.9, LA1.13, LA1.15, LA1.20) o il secondo periodo (LA1.3, LA1.6, LA1.8, LA1.10, LA1.16, LA1.17, LA1.21), a eccezione di una LA (LA1.12) che inizia al mese 13 e termina al mese 36; le LA in carico alle Università co-beneficiarie (LA1.2, LA1.5, LA1.11, LA1.14, LA1.18, LA1.19) hanno tutte inizio al mese 13 e fine al mese 36.

In merito alla programmazione della richiesta di contributi in relazione ai SAL previsti, nell'ipotesi che in fase di valutazione non ci siano stralci sui costi della presente proposta di Progetto, in base alla ripartizione dei costi preventivati per le diverse LA e fatta salva la richiesta di acconti/anticipi, nel SAL1 intermedio si prevede una richiesta di contributo pari a circa 0,7 M€, mentre nel SAL2 finale sarà richiesto l'importo a saldo, paria a circa 1,8 M€, del costo totale della proposta di Progetto.

Nell'insieme il Progetto, a fronte di un investimento totale richiesto di 2,5 M€, consentirà di generare risultati, avanzamenti tecnologici e ricadute di grande rilevanza sia sull'industria di settore che sul sistema energetico nazionale, attraverso la realizzazione o il potenziamento di:

- i) dimostratori tecnologici, che saranno funzionali non solo alla validazione sperimentale e alla verifica prestazionale delle tecnologie proposte ma anche a dare evidenza agli stakeholder della capacità innovativa dei prodotti della ricerca sviluppati, della loro fattibilità tecnica, nonché della loro applicabilità in settori industriali attualmente caratterizzati dall'impiego di fonti energetiche di tipo fossile;
- ii) facility, prototipi e dispositivi per la sperimentazione in ambiente rilevante, che permetteranno di sviluppare e convalidare le soluzioni tecnologiche selezionate e di estrapolare, anche attraverso modelli e analisi numeriche, le caratteristiche operative di componenti e sistemi su scala reale;
- iii) prototipi e dispositivi “proof of concept” / in scala da laboratorio, che consentiranno di studiare e verificare il comportamento dei materiali e dei fenomeni fisici coinvolti nelle (poche) attività di ricerca a più basso TRL.

Di seguito si analizza la fattibilità tecnico-scientifica per ogni linea di ricerca del Progetto, inserita nell'ambito della tematica di riferimento.

Tematica “sistemi di accumulo termico per impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER e per la fornitura di energia su base stagionale”:

- Con riferimento alla linea di ricerca sulla “comparazione sperimentale tra sistemi di accumulo termico, di tipo termoclino a sali fusi, per l'ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER”, verrà eseguito un up-grade del sistema di stoccaggio termico, di tipo termoclino a sali fusi, realizzato nel precedente triennio e asservito all'impianto sperimentale Fresnel “ENEASHIP” del C.R. ENEA di Casaccia. Nello specifico verrà sostituito uno scambiatore di calore a olio diatermico, riscaldato da una caldaia elettrica alimentabile da PV (o da altra tecnologia FER “elettrica”), con una serie di resistenze corazzate direttamente immerse nel fluido di stoccaggio ed alimentate sempre da PV (ovvero da altra tecnologia FER “elettrica”). La geometria ed il design delle resistenze elettriche verrà studiato appositamente per

questo tipo di applicazioni.

- Per la linea di ricerca sui “sistemi di riscaldamento elettrico a microonde dei sali fusi per l’ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER”, la tecnologia del riscaldamento con microonde è matura in diversi settori industriali, a partire da quello alimentare. Nell’ambito del precedente triennio, si è dimostrato che la tecnologia delle microonde è applicabile per l’accoppiamento diretto con sistemi di accumulo a sali fusi ed ha il potenziale di trasferire una maggiore potenza per unità di massa rispetto ai sistemi di riscaldamento elettrico resistivo (effetto Joule). Attraverso il dispositivo “proof of concept” realizzato e sperimentato nel precedente triennio, è stato possibile verificare sperimentalmente che l’efficienza dell’assorbimento delle microonde da parte dei sali dipende significativamente dalla frequenza di generazione del magnetron, e che la frequenza di generazione ottimale, che minimizza il coefficiente di riflessione della cavità, è strettamente correlato alla temperatura dei sali. Per tale motivo, nella presente linea di ricerca, la principale sfida tecnica risiede nel garantire, in ogni condizione di funzionamento dell’accumulo termico, la minima riflessione e il massimo assorbimento delle microonde. Tale obiettivo può essere perseguito attraverso la regolazione della frequenza di generazione delle microonde al variare della temperatura dei sali. Ciò richiede di acquisire un magnetron dotato di regolatore di frequenza, di accessoriare il serbatoio con una sensoristica efficace ed accurata, non interferita dalle microonde (ad es. fibre ottiche o termocoppie schermate al posto delle attuali termocoppie immerse nei sali, sensore di livello ad ultrasuoni), e di revisionare il progetto dell’attuale dispositivo per ridurre le dispersioni termiche e garantire la massima efficienza di assorbimento delle microonde. Le criticità tecniche di cui tener conto riguardano principalmente l’identificazione di soluzioni sensoristiche che garantiscono un’accurata rilevazione dei parametri di processo, senza essere interferite dal campo elettromagnetico, e di soluzioni progettuali per la corretta stratificazione termica all’interno del serbatoio. Le analisi numeriche e teoriche beneficeranno dei risultati ottenuti nella prima parte della linea di ricerca, in cui si misureranno le proprietà dielettriche dei sali fusi. In particolare, per la misura delle proprietà dielettriche, verranno utilizzate le resistenze elettriche per portare i sali in temperatura, mentre il Vector Network Analyzer (VNA) genererà il segnale elettromagnetico (a bassa potenza) e misurerà la risposta del sistema. La linea di ricerca si articolerà in 3 fasi: (1) valutazione sperimentale delle proprietà dielettriche dei sali fusi, sia binari che ternari, in un ampio intervallo termico operativo (190-550 °C), (2) individuazione degli interventi migliorativi sul dispositivo prototipale, soprattutto associati al sistema sensoristico, per consentire di testare il serbatoio di sali fusi nelle condizioni operative ottimali, (3) svolgimento della campagna sperimentale.

- Per la linea di ricerca sui “sistemi di accumulo termico stagionali, di tipo termo-chimico a zeoliti, alimentabili da CST”, è previsto lo sviluppo di un sistema di accumulo ottimizzato dal punto di vista: (i) dell’applicazione stagionale; (ii) delle performance energetiche; (iii) della flessibilità di utilizzo, concependo il nuovo sistema di accumulo in forma modulare e prevedendo la possibilità di utilizzare diversi fluidi termo-vettori (acqua e olio diatermico) per diversificarne il range di utilizzo sia lato utenza che lato produzione. Inoltre, il ricorso a sensoristica di precisione consentirà un monitoraggio accurato delle varie fasi del ciclo termodinamico in modo da analizzare nel dettaglio le dinamiche di accumulo e rilascio del calore da parte del letto di zeoliti a breve, medio e lungo periodo. Infine, alle attività di analisi e monitoraggio sperimentale saranno affiancate attività modellistiche finalizzate all’analisi e previsione del comportamento del sistema di accumulo stagionale nelle diverse condizioni operative.

Tematica “materiali e dispositivi per il monitoraggio degli impianti CSP/CST e l’innovazione dei processi O&M”:

- Con riferimento alla linea di ricerca sui “sensori di sporco/failure degli specchi per la digitalizzazione del campo solare degli impianti CSP/CST”, a partire da una piattaforma realizzativa di materiali piezoelettrici a base di politipoidi del nitrato di alluminio compatibili con le proprietà ottiche degli specchi solari e con i rivestimenti autopulenti sviluppati nel precedente triennio, l’attività di ricerca prevederà un primo stadio di ottimizzazione dell’effetto piezoelettrico di differenti nitrati fabbricati attraverso la tecnica dello sputtering reattivo, al fine di scegliere tra essi quello più idoneo a fabbricare un prototipo di area sensorizzata sensibile all’effetto gravimetrico della polvere da testare sull’impianto Fresnel “ENEA-SHIP” del C.R. ENEA di Casaccia. Parallelamente, saranno fabbricati e caratterizzati nuovi materiali nanocompositi luminescenti idonei alla realizzazione, su scala laboratoriale, di un prototipo di sensore ottico. L’idea prospettica è quella di costruire, in funzione della geometria del campo solare, un pattern riconoscibile a distanza (e quindi interrogabile), modulando la quantità di specie luminescenti nelle formulazioni dei nanocompositi. In definitiva, le attività nel loro complesso mirano a integrare componenti sensoristiche nei rivestimenti autopulenti, ma non si esclude di sviluppare soluzioni più generiche, idonee a specchi solari non rivestiti di autopulenti quali, ad esempio, quelli già montati nei campi solari CSP/CST già in esercizio.

- Per la linea di ricerca sulla “diagnosi a ultrasuoni per la rilevazione di occlusioni solide nel piping di impianti CSP/CST utilizzando miscele di sali fusi come fluido termovettore”, lo studio condotto nel precedente triennio ha dimostrato che la tecnologia a ultrasuoni rappresenta una soluzione promettente per l’applicazione in oggetto. Questa tecnologia, come noto, utilizza impulsi ultrasonori per identificare i segnali riflessi dalle discontinuità presenti nel fluido termovettore, causate dalla solidificazione delle miscele di sali. L’obiettivo della linea di ricerca, che prende spunto direttamente dai risultati ottenuti nel precedente triennio, è sviluppare, realizzare in forma di prototipo e convalidare un dispositivo di diagnosi a ultrasuoni per rilevare occlusioni solide nelle tubazioni degli CSP/CST che utilizzano sali fusi come fluido termovettore. La formazione di occlusioni di sali solidificati rappresenta un problema particolarmente significativo in curve, valvole, restrizioni e, in generale, in componenti speciali del piping degli impianti CSP/CST a sali fusi, poiché le occlusioni possono causare malfunzionamenti e riduzioni delle prestazioni, oltre a prolungare i tempi di ripristino dopo le consuete attività di manutenzione. L’attività di ricerca si articolerà in due fasi. Nella prima fase verrà sviluppato un progetto di dettaglio per il dispositivo a ultrasuoni, finalizzato a definire le quantità e le specifiche tecniche di tutti i componenti necessari per realizzarlo (in forma di prototipo). Nella seconda fase, sulla

base di un capitolato tecnico basato sul suddetto progetto di dettaglio, verrà affidata ad una società esterna specializzata la realizzazione del dispositivo che verrà testato sul circuito sperimentale "MoSE" (Molten Salt Experiments) del C.R. ENEA di Casaccia. Durante questa fase, il dispositivo dovrà essere calibrato per adattarsi alle condizioni specifiche dell'impianto, regolando i parametri di rilevazione e utilizzando i dati acquisiti in diverse configurazioni operative. La sperimentazione del dispositivo sul circuito "MoSE" vedrà la stretta collaborazione tra il personale del co-beneficiario UniNA, responsabile della progettazione del dispositivo, e quello dell'affidatario ENEA, esperto d'impianti CSP/CST a sali fusi e, nella fattispecie, della gestione del circuito "MoSE". Al termine della sperimentazione, ci si propone di elaborare linee guida per l'utilizzo del dispositivo di diagnosi a ultrasuoni su impianti CSP/CST anche di scala commerciale. Tematica "integrazione degli impianti CSP/CST in sistemi di poligenerazione distribuita asserviti a utenze industriali e civili":

- Con riferimento alla linea di ricerca sui "sistemi di cogenerazione distribuita, alimentati da impianti CSP/CST ibridizzati con PV, asserviti a utenze industriali e civili locali", verrà progettato e realizzato un dimostratore tecnologico di sistema di cogenerazione distribuita di elettricità e calore. Nello specifico verrà installato un impianto fotovoltaico che alimenterà le resistenze elettriche immerse nel sistema di accumulo termocline a sali fusi così ibridizzato, verrà installato un sistema ORC in grado di scaricare l'energia accumulata nel sistema di stoccaggio termico e produrre energia elettrica che verrà utilizzata per alimentare una utenza locale costituita dall'illuminazione della "zona impianto". Successivamente alla realizzazione, verrà svolta una campagna sperimentale finalizzata a verificare la funzionalità del sistema, studiare i transitori di carica e scarica del sistema di stoccaggio e ottimizzare le logiche di gestione e controllo del dimostratore per massimizzarne l'efficienza. Si utilizzeranno le serie temporali ottenute dai sensori dislocati sul dimostratore tecnologico e, in particolare, sui sottosistemi CSP/CST in analisi per sviluppare metodologie AI per il forecasting della produzione energetica. I dati prestazionali risultanti permetteranno la valutazione della completezza della base sensoristica orientando il processo di digitalizzazione dell'impianto. Una criticità rilevante è relativa alla disponibilità dei dati necessari all'addestramento dei componenti su citati. Nel caso si verifichi al tempo stabilito (M18) una mancanza di una base dati sufficiente, essa potrà essere agevolmente superata utilizzando serie temporali pregresse (ottenute da sensori presenti su impianti solari a concentrazione precedentemente implementati in ENEA) con impatti limitati sulla qualità del risultato finale in relazione all'obiettivo. Infine, per quanto attiene alle attività di sviluppo del prototipo di collettore micro-PTC di UniFI, si intende capitalizzare i risultati ottenuti nel precedente triennio soprattutto in termini di criticità rilevate e margini di miglioramenti prospettati, operando a livello di tubo ricevitore, materiali riflettenti e componente "parabola / struttura collettore", nonché di sistema di inseguimento. Con specifico riferimento alla prevista produzione di un certo numero di prototipi di "tubi assorbitori" (da intendersi come tubi substrati di acciaio dei ricevitori con sopra depositato il coating solare), questa potrebbe comportare un consumo non trascurabile dei target (materiali di consumo) dell'impianto di sputtering, con ripercussioni sulle velocità di crescita dei singoli materiali costituenti il coating ovvero sulla ripetibilità dei processi di deposizione e, infine, sulle prestazioni fototermiche del coating che potrebbero discostarsi eccessivamente dalle "prestazioni obiettivo" del prototipo di coating realizzato nel precedente triennio. Per monitorare e superare tale criticità sono previsti tutta una serie di accorgimenti, prima e durante la produzione di prototipi di tubi assorbitori per il sistema micro-PTC di UniFI, tra cui: (i) verifica della ripetibilità dei depositi, valutando velocità di crescita e proprietà ottiche dei singoli materiali costituenti il coating; (ii) valutazione, ogni n° 4 tubi assorbitori prodotti, delle prestazioni fototermiche del coating, che devono risultare quanto più prossime possibili a quelle del coating di riferimento; (iii) "riformulazione" delle ricette di deposizione del coating.
- Per la linea di ricerca sull'"analisi delle potenzialità degli impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER per la decarbonizzazione dell'industria", come prima attività saranno censite le principali tipologie di industrie energivore presenti in Italia e sarà caratterizzato il loro fabbisogno energetico in termini di energia elettrica e termica (livello di temperature e quantità). Poi, i modelli di ottimizzazione del progetto di impianti CSP ibridizzati con PV e/o eolico, sviluppati nei precedenti trienni della RdS, saranno estesi per includere le tecnologie di interesse per la produzione di calore industriale. Ad esempio, verranno inclusi i modelli di collettori di tipo Fresnel e parabolici di piccola scala. Verranno anche inclusi un modello di accumulo termico termocline indiretto e, come power block, il modello di cicli a fluido organico. Infine, verranno integrati diversi modelli di pompe di calore ad alta temperatura in modo tale che possano essere selezionate dall'ottimizzatore per fornire calore decarbonizzato all'industria quando l'irraggiamento diretto non è sufficiente. Man mano che saranno disponibili i risultati delle altre linee di ricerca (es. dati sperimentali di esercizio del prototipo di sistema di accumulo termocline ibridizzato, alimentabile da CSP/CST e altre tecnologie FER), i modelli del tool saranno migliorati, validati e ricalibrati. Non si prevedono particolari criticità legate all'integrazione di tali modelli nel tool di ottimizzazione. Il tool di ottimizzazione sarà poi utilizzato per ottimizzare il progetto di sistemi CSP/CST ibridizzati cogenerativi a servizio di diverse tipologie di industrie caratterizzate da differenti livelli di temperatura del calore richiesto e/o diverse taglie. I risultati consentiranno di valutare le potenzialità del solare a concentrazione per la decarbonizzazione del settore industriale sia in termini di riduzione di emissioni di CO<sub>2</sub> che di costi.
- Per la linea di ricerca sullo "studio concettuale dell'utilizzazione di calore solare da impianti a concentrazione per la valorizzazione di matrici organiche residuali mediante processi pirolitici e coproduzione di elettricità", si procederà ad integrare bilanci di materia e di energia con le equazioni cinetiche che descrivono il processo pirolitico al fine di correlare la richiesta di energia termica del processo con le sue prestazioni. Stabilita la richiesta termica del processo, si procederà a dimensionare il campo solare variandone il numero di stringhe per valutare la taglia più idonea a garantire una elevata alimentazione solare. Si procederà, quindi, a formulare uno schema di integrazione e a valutarne la sostenibilità economica.

Tenuto conto della complessità del Progetto e delle ambiziose attività di ricerca proposte che, si prevede, consentiranno di ottenere risultati tecnici e scientifici di assoluto rilievo, e con l'obiettivo di incrementare l'impatto del Progetto sul sistema Paese, sono state

previste le due specifiche LA dedicate alle attività di gestione del Progetto (incluso il coordinamento tra affidatario ENEA e Università co-beneficiarie) e di comunicazione e disseminazione dei risultati nei mesi 1-18 (LA1.20) e 19-36 (LA1.21) del triennio di Progetto.

Come evidenziato in precedenza, il Progetto prevede un unico work package (WP1) articolato in 3 tematiche scientifico-applicative tra di loro interconnesse; tali 3 tematiche di ricerca concorrono, in maniera sinergica e coerente, al raggiungimento dell'obiettivo comune di rendere disponibili soluzioni tecniche e tecnologiche innovative e scalabili (i) per l'efficace ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER "elettriche" (PV in primis), (ii) funzionali alla digitalizzazione degli impianti CSP/CST e (iii) per l'integrazione degli impianti CSP/CST con le reti energetiche e con utenze industriali e/o civili, in applicazioni di generazione e poligenerazione sia centralizzata che distribuita. La finalità ultima del WP1 è incrementare la dispacciabilità dell'energia (elettrica e termica) prodotta da fonte solare, aumentare la versatilità di utilizzo degli impianti CSP/CST (tal quali o ibridizzati con altre tecnologie FER) e, in una prospettiva di medio periodo, ridurre il costo di generazione dell'energia mediante il miglioramento delle performance (e, quindi, della producibilità) e la riduzione delle spese operative e di manutenzione (O&M).

Come richiesto in fase di valutazione del Progetto, è di seguito fornita una descrizione finalizzata a evidenziare, in una visione unitaria, il contributo delle 3 tematiche di ricerca e delle attività di "gestione del Progetto, comunicazione e disseminazione dei risultati" agli obiettivi e finalità dell'unico work package (WP1) previsto nel Progetto.

Con riferimento alla prima tematica "sistemi di accumulo termico per impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER e per la fornitura di energia su base stagionale", si evidenzia che grazie ai sistemi di accumulo termico (poco costosi e senza particolari limitazioni di capacità o durata) gli impianti CSP/CST sono in grado di fornire energia (elettrica e termica) rinnovabile dispacciabile, distinguendosi fortemente dalle tecnologie FER non programmabili, quali fotovoltaico (PV) ed Eolico. Una ottimale ibridizzazione degli impianti CSP/CST con altre tecnologie FER "elettriche" più mature (in primis PV), realizzata mediante integrazione a livello del componente "sistema di accumulo termico", promette una sensibile riduzione del costo dell'energia. In tale ambito, la prima tematica rappresenta un punto nodale del WP1, poiché mira a sviluppare soluzioni di accumulo termico innovative, affidabili e scalabili, fondamentali per garantire la continuità di erogazione dell'energia da fonte solare, sia in impianti solari a concentrazione tal quali che efficacemente ibridizzati con altre tecnologie FER, e aumentare la versatilità di utilizzo e la producibilità degli impianti con potenziale riduzione del costo di generazione dell'energia. Le 3 linee di ricerca comprese nella prima tematica sono complementari e coprono un ampio spettro di esigenze applicative, da quelle di fornitura di calore/elettricità a breve-medio termine a quelle di calore su base stagionale, in sistemi di produzione sia centralizzata che distribuita. In particolare, saranno sviluppati:

- Sistemi di accumulo termocline dotati di resistenze elettriche immerse nei sali fusi per l'ibridizzazione del CSP/CST con PV, in grado di immagazzinare sotto forma di calore l'elettricità in eccesso da PV.
- Sistemi di riscaldamento elettrico a microonde dei sali fusi per l'ibridizzazione del CSP/CST con PV, con più elevate potenze elettriche scaricabili da PV (rispetto a sistemi basati sull'effetto Joule) per una fase di carica veloce dell'accumulo termico.
- Sistemi di accumulo di tipo termo-chimico a zeoliti per la fornitura differita di calore a media temperatura, per il bilanciamento stagionale domanda/offerta in applicazioni civili e industriali del CST.

Con riferimento alla seconda tematica "materiali e dispositivi per il monitoraggio degli impianti CSP/CST e l'innovazione dei processi O&M", si evidenzia che gli impianti CSP/CST hanno, ad oggi, costi di generazione dell'energia superiori rispetto a tecnologie FER più mature (PV in primis) anche a causa di processi O&M più complessi. Per incrementare l'efficienza operativa degli impianti CSP/CST è prioritaria la digitalizzazione degli impianti per un più efficace monitoraggio del loro stato di funzionamento e per la riduzione delle spese operative e di manutenzione. In tale ambito, con la finalità di creare un ponte "hardware" tra taluni sottosistemi degli impianti solari a concentrazione (campo solare, piping) e sistemi di controllo e gestione degli impianti basati (in una prospettiva di medio-lungo termine) su tecnologie ICT con architetture AI/ML (Artificial Intelligence/Machine Learning), la seconda tematica del WP1 comprende 2 linee di ricerca, di cui quella sui sensori per gli specchi del campo solare è applicabile a qualunque configurazione e taglia d'impianto CSP/CST, mentre quella sulla diagnosi a ultrasuoni per la rilevazione di occlusioni solide nel piping è di particolare (ma non esclusivo) interesse per impianti solari a concentrazione con "tecnologia ENEA a sali fusi" (ovvero a collettori lineari parabolici, PTC, o Fresnel, LFC, e utilizzanti miscele di sali fusi come fluido termovettore e materiale di accumulo) con applicazione di elezione la generazione centralizzata di elettricità dispacciabile in impianti CSP di taglia medio-grande. In particolare, saranno sviluppati:

- Sensori piezoelettrici per specchi autopulenti (che saranno sperimentati in campo sull'impianto Fresnel "ENEA-SHIP" del C.R. ENEA di Casaccia) e sensori ottici "proof of concept" (per l'acquisizione di informazioni mediante sistemi di rilevazione aerea), integrati negli specchi solari e in grado di fornire informazioni sul funzionamento e livello di sporco ed eventuale failure degli specchi, consentendo una razionalizzazione degli interventi di pulizia e manutenzione del campo solare.
- Un dispositivo di diagnosi a ultrasuoni (che sarà validato in laboratorio) per identificare presenza, posizione e dimensioni delle occlusioni solide di sali nel piping degli impianti CSP/CST a sali fusi, con possibilità di eseguire la manutenzione preventiva del piping senza la necessità di aprire le linee dell'impianto, con vantaggi in termini di continuità operativa e contenimento delle spese di fermo impianto.

Con riferimento alla terza tematica "integrazione degli impianti CSP/CST in sistemi di poligenerazione distribuita asserviti a utenze industriali e civili", si evidenzia che i sistemi di cogenerazione distribuita alimentati da impianti CSP/CST ibridizzati con PV, consentendo di superare le limitazioni delle tecnologie CSP/CST e PV tal quali (es. costo del campo solare per il CSP/CST, del power block per il CSP e dei sistemi BESS per il PV, non programmabilità della generazione di elettricità per il PV), si presentano come tecnologia di elezione per la

fornitura di calore (a diverse T) ed elettricità dispacciabili per la decarbonizzazione dei settori industriale e civile; tuttavia, una potenziale barriera alla loro effettiva diffusione è rappresentata, secondo gli stakeholder di settore, dalla mancanza di dimostratori che evidenzino efficacia, affidabilità e modularità della tecnologia. In tale ambito, la terza tematica del WP1, che comprende 3 linee di ricerca, si propone di rendere disponibili un dimostratore tecnologico, modelli predittivi AI/ML e analisi di fattibilità per dimostrare la concreta efficacia dell'ibridizzazione del CSP/CST con il PV in applicazioni di prossimità, modulari, versatili, "intelligenti" (per la riduzione della complessità di gestione e per una migliore affidabilità degli impianti), appositamente sviluppate per la fornitura di energia termica ed elettrica a utenze industriali e civili anche dislocate in contesti fortemente antropizzati. In particolare, saranno sviluppati:

- Un dimostratore tecnologico, realizzato in forma di prototipo implementando l'impianto Fresnel "ENEA-SHIP" e che integrerà il sistema di accumulo termocline ibridizzato (sviluppato nella prima tematica del WP1) che sarà (i) alimentato dal preesistente campo solare Fresnel e da un impianto PV e (ii) allacciato a un sistema ORC e a una interfaccia di processo per la fornitura di energia a utenze locali del C.R. ENEA di Casaccia.
- Modelli basati su architetture AI/ML per il forecasting della producibilità (elettrica/termica) dei sottosistemi CSP/CST del dimostratore tecnologico, che rappresenteranno un significativo elemento di innovazione con impatti sia nell'integrazione con le utenze (predicibilità della risorsa) sia nell'O&M avanzato, costituendo un primo approccio alla digitalizzazione degli impianti CSP/CST.
- Un modulo prototipale in "versione up-grade" del sistema micro-PTC dell'Università degli Studi di Firenze (dotato di tubi ricevitori con coating solare ENEA di ultima generazione e che sarà collegato al dimostratore tecnologico) per applicazioni di cogenerazione distribuita in contesti civili e industriali fortemente antropizzati, risultando integrabile in strutture edilizie.
- Analisi tecnico-economiche-ambientali delle potenzialità degli impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER per la decarbonizzazione dell'industria, con risultati (quantificati anche in termini di NPV, PBT, IRR) utili come quadro di riferimento per investitori pubblici e privati.
- Studio di integrazione degli impianti solari a concentrazione con processi pirolitici per la produzione di bio-olio a partire da matrici organiche residuali e co-produzione di elettricità, con promozione del concetto di impiego del calore solare a temperatura medio-alta per l'economia circolare e la decarbonizzazione dell'industria.

Con riferimento alle attività di "gestione del Progetto, comunicazione e disseminazione dei risultati", si evidenzia che a supporto della realizzazione delle precedenti 3 tematiche di ricerca del WP1 sono previste attività trasversali di project management e dissemination finalizzate al monitoraggio dell'avanzamento delle attività e dell'ottenimento dei risultati, al superamento delle criticità, al coordinamento tra l'affidatario ENEA e le Università co-beneficarie e alla valorizzazione degli output del WP1 nell'ambito della comunità scientifica nazionale e internazionale. Inoltre, tali attività trasversali si propongono di favorire l'interazione con gli stakeholder (ricerca e industria) e il trasferimento tecnologico al sistema produttivo nazionale dei risultati e prodotti della ricerca del WP1 più prossimi all'applicazione, con l'obiettivo ultimo di massimizzare l'impatto del Progetto sul sistema Paese.

Come richiesto in fase di valutazione del Progetto, sono di seguito descritte le interazioni tra le 3 tematiche di ricerca e le attività di "gestione del Progetto, comunicazione e disseminazione dei risultati" che hanno portato a integrarle nell'unico work package (WP1) previsto nel Progetto. Tale integrazione è frutto di una precisa scelta strategica e metodologica; con specifico riferimento alle 3 tematiche di ricerca, infatti, queste sono tra di loro complementari ma sinergiche e presentano interazioni trasversali che rafforzano la coerenza della proposta progettuale anche ai fini del trasferimento al sistema produttivo nazionale delle soluzioni tecniche e tecnologiche innovative che si intendono sviluppare nell'ambito delle ricerche di Progetto.

In particolare, si individuano le seguenti interazioni "dirette" tra le 3 tematiche di ricerca e le attività di "gestione del Progetto, comunicazione e disseminazione dei risultati" del WP1, ovvero le interazioni già "previste" nella proposta progettuale o comunque "possibili" in caso di ottenimento di taluni risultati/prodotti della ricerca in anticipo rispetto alle tempistiche stabilite:

- In generale, l'ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER, e in particolare con PV, rappresenta un filone di ricerca strategico trasversale alle tematiche 1 e 3 e favorisce l'interazione tra queste tematiche. In particolare, il prototipo di sistema di accumulo termocline ibridizzato dotato di resistenze elettriche corazzate immerse nei sali fusi, dapprima sperimentato collegando le resistenze a un generatore che simula l'alimentazione da PV o altra tecnologia FER "elettrica" (tematica 1), è previsto che venga integrato nel dimostratore tecnologico (tematica 3) per realizzare l'ibridizzazione del preesistente impianto Fresnel "ENEA-SHIP" con un nuovo impianto PV. Inoltre, nella seconda parte delle attività della linea di ricerca sull'analisi delle potenzialità degli impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER per la decarbonizzazione dell'industria (tematica 3), è esplicitamente previsto che i modelli dei componenti di impianti CSP/CST nel tool di ottimizzazione sviluppato da PoliMI (tematica 3) siano migliorati adoperando i dati ottenuti dalla sperimentazione del prototipo di sistema di accumulo termocline ibridizzato e dalle simulazioni svolte da Politecnico di Torino sul funzionamento del termocline (tematica 1).
- In generale, la digitalizzazione degli impianti CSP/CST è un filone di ricerca strategico trasversale alle tematiche 2 e 3 e favorisce l'interazione tra queste tematiche. In particolare, laddove lo sviluppo del prototipo di area riflettente autopulente sensorizzata piezoelettrica di medie dimensioni e la sua sperimentazione outdoor sul campo solare dell'impianto Fresnel "ENEA-SHIP" siano ottenuti con un certo anticipo rispetto ai tempi previsti (tematica 2) è possibile un tentativo di implementazione dei dati acquisiti nella sperimentazione del suddetto prototipo di sensore nei modelli predittivi AI/ML (tematica 3) per un primo approccio alla futura digitalizzazione del campo solare degli impianti CSP/CST, finalizzata alla detezione di anomalie di funzionamento e degrado delle performance degli specchi e alla gestione in remoto e razionalizzazione degli interventi di pulizia/manutenzione del campo solare.

- Nell'ambito delle 3 tematiche è prevista la condivisione dell'ambiente di test (impianto Fresnel "ENEA-SHIP"), favorendo un'interazione continua tra sviluppo dei singoli componenti (es. sistema di accumulo termoclineo, dispositivi sensori) e convalida sperimentale in ambiente operativo.
  - Le attività di "gestione del Progetto, comunicazione e disseminazione dei risultati", pur non essendo di tipo scientifico-tecnologico in senso stretto, consentono la gestione centralizzata ed efficiente di tutte le attività delle 3 tematiche di ricerca (promuovendo continue interazioni tra le attività delle diverse tematiche, anche in occasione di riunioni di coordinamento congiunte) e di diffondere in modo integrato e coordinato i risultati delle ricerche del WP1, rafforzando l'impatto sistemico del Progetto.
- Oltre alle suddette interazioni "dirette" tra le 3 tematiche di ricerca e le attività di "gestione del Progetto, comunicazione e disseminazione dei risultati" del WP1, si individuano di seguito alcuni esempi di possibili interazioni "indirette" tra le 3 tematiche, ovvero inerenti all'"applicazione pratica" e al trasferimento tecnologico, su un orizzonte temporale di medio o medio-lungo periodo, di taluni risultati/prodotti della ricerca:
- In una prospettiva di medio periodo, si vogliono possibilmente rendere disponibili soluzioni tecniche e tecnologiche avanzate per impianti CSP (PTC e, primariamente, LFC) di taglia medio-grande, operanti ad alta T (fino a 550 °C), per la generazione centralizzata di energia elettrica, con fluido termovettore e di accumulo costituito da miscele di sali fusi, dotati di tubi ricevitori con il coating ENEA per alta temperatura sviluppato nel precedente triennio della RdS (con prestazioni che costituiscono lo "stato dell'arte" della tecnica), con specchi autopulenti e sensorizzati (tematica 2) ed equipaggiati con dispositivi di diagnosi a ultrasuoni per la rilevazione della solidificazione dei sali fusi nel piping dell'impianto (tematica 2). Tali impianti CSP "di potenza" potrebbero essere ibridizzati con altre tecnologie FER "elettriche", PV in primis, mediante integrazione a livello di sistema di accumulo termico dotato delle soluzioni modulari messe a punto nella tematica 1, con particolare riferimento, in una prospettiva di medio periodo, ai sistemi di accumulo termoclineo a sali fusi ibridizzati con scambiatori elicoidali alimentati da PV o (più probabilmente) con resistenze elettriche immerse nei sali alimentate da PV oppure, in una prospettiva di medio-lungo periodo, a sistemi di accumulo termico dotati di innovativi sistemi di riscaldamento a microonde dei sali fusi alimentati da PV. La digitalizzazione di questi impianti CSP (tal quali o ibridizzati con PV) mediante applicazione di modelli AI/ML predittivi della producibilità e sfruttabili per la detezione di anomalie di funzionamento/degrado delle performance dei componenti (tematica 3) rappresenterebbe un'opzione altamente innovativa percorribile su un orizzonte temporale di medio-lungo periodo.
  - In una prospettiva di medio periodo, si vogliono possibilmente rendere disponibili innovativi sistemi micro-PTC dotati di tubi ricevitori con coating solare ENEA di ultima generazione (tematica 3), superfici riflettenti sensorizzate provviste di economici rivestimenti autopulenti (tematica 2), abbinati a compatti sistemi di accumulo a zeoliti (tematica 1) per la fornitura distribuita, anche su base stagionale, di calore fino a 250 °C per applicazioni SHIP o per applicazioni civili di "solar heating & cooling", ovvero, nel caso, abbinati a sistemi di accumulo termoclineo a sali fusi (tematica 1) per la cogenerazione distribuita di elettricità (con cicli ORC) e di calore fino a 350-400 °C per utenze industriali e civili; l'opzione di ibridizzazione della tecnologia del micro-PTC con PV tramite un sistema di accumulo termoclineo ibridizzato (tematica 1 e 3) risulterebbe un'opzione potenzialmente percorribile.
  - Soluzioni tecniche e tecnologiche avanzate per sistema di cogenerazione distribuita di elettricità e calore, alimentati da impianti CSP/CST integrati con PV tramite un sistema di accumulo termoclineo ibridizzato, asservibili a utenze industriali e civili locali (tematiche 1 e 3), potrebbero essere resi disponibili anche in un orizzonte temporale di breve-medio periodo. L'implementazione, in questi sistemi, di specchi autopulenti sensorizzati (tematica 2), i cui parametri significati per lo stato di sporco/funzionamento/failure vengano processati da modelli AI/ML (tematica 3) per la digitalizzazione del campo solare, risulterebbe effettivamente realizzabile in un orizzonte temporale di medio-lungo periodo.

Concludendo, in considerazione della complessità e innovatività tecnico-scientifica del Progetto, della presenza di 6 partner, del numero di linee di attività, che sebbene ridotto rispetto ai trienni precedenti rimane piuttosto elevato (21 LA contro le 26 del triennio 2022-2024 e le 46 del triennio 2019-2021), e sulla base della positiva esperienza del precedente triennio, con la finalità di sviluppare le ricerche in costante sinergia tra l'affidatario ENEA e le 5 Università co-beneficiarie per tutta la durata del Progetto e di superare eventuali criticità che dovessero insorgere, contribuendo all'effettiva fattibilità del Progetto, il presente capitolato tecnico del Progetto 1.9 "Solare Termodinamico" integra il "PIANO DI COORDINAMENTO" di seguito riportato.

-----

## PIANO DI COORDINAMENTO

### 1. SCOPO

Il presente documento ha lo scopo di esplicitare il Piano di Coordinamento concordato tra l'affidatario ENEA e le Università co-beneficiarie nella realizzazione del Progetto 1.9 "Solare Termodinamico" del Piano Triennale di Realizzazione 2025-2027 della Ricerca di Sistema elettrico nazionale.

Dall'analisi della descrizione, riportata nel capitolato di Progetto, delle attività di ricerca in carico all'affidatario e ai singoli co-beneficiari è possibile evincere, in modo chiaro, che sono escluse sovrapposizioni di attività tra affidatario e co-beneficiari ma sono presenti, invece,

collegamenti tra attività di ricerca che risultano complementari e sinergiche e che sono state appositamente elaborate e proposte per sfruttare e valorizzare, per tutta la durata del Progetto, le diverse e specifiche conoscenze, competenze, esperienze pregresse (anche maturate nei precedenti trienni della RdS) e dotazioni (software, strumentali e impiantistiche) dell'affidatario e dei co-beneficiari. Nello specifico, per le linee di ricerca articolate in linee di attività (LA) in carico sia all'affidatario che a un co-beneficiario ("comparazione sperimentale tra sistemi di accumulo termico, di tipo termocline a sali fusi...", "sistemi di riscaldamento elettrico dei sali fusi, con tecnologia a microonde...", "diagnosi a ultrasuoni per la rilevazione di occlusioni solide nel piping di impianti CSP/CST...", "sistemi di cogenerazione distribuita, alimentati da impianti CSP/CST ibridizzati con PV...") la suddetta complementarità e sinergia è palese vista l'evidente interconnessione tra le LA in cui si sviluppa ogni linea di ricerca. Tuttavia, è importante evidenziare che detta complementarità e sinergia esiste e deve essere consolidata e sfruttata a pieno, a un più alto livello e per tutta la durata del Progetto, tra le ricerche sviluppate dall'affidatario e dai co-beneficiari nell'ambito di ognuna delle 3 tematiche scientifico-applicative e, trasversalmente e unitariamente, nell'insieme delle 3 tematiche (e delle linee di ricerca in cui queste si declinano). Ciò è fondamentale per raggiungere con pieno successo gli obiettivi generali del Progetto e nell'ottica dell'applicazione pratica, in una prospettiva di medio periodo, dei risultati/prodotti della ricerca.

Il presente documento riporta:

- composizione del Comitato di Coordinamento;
- proposta di coordinamento, ai fini dell'esecuzione del Progetto;
- calendario/tempistica delle azioni di coordinamento.

## 2. COMPOSIZIONE DEL COMITATO DI COORDINAMENTO

Al fine di garantire che gli obiettivi generali del Progetto 1.9 "Solare Termodinamico" siano perseguiti, per tutta la durata del Progetto, con un approccio sinergico e complementare dall'affidatario ENEA e dalle Università co-beneficarie, è costituito un Comitato di Coordinamento (di seguito CdC) composto dal capoprogetto, dai referenti delle linee di ricerca, dai referenti dell'affidatario e dei co-beneficiari:

- Ing. Antonio Guglielmo (ENEA), capoprogetto e referente per le attività di "Gestione del Progetto - Comunicazione e disseminazione dei risultati";
- Ing. Marco D'Auria (ENEA), referente delle linee di ricerca "Comparazione sperimentale tra sistemi di accumulo termico, di tipo termocline a sali fusi, per l'ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER" e "Sistemi di cogenerazione distribuita, alimentati da impianti CSP/CST ibridizzati con PV, asserviti a utenze industriali e civili locali";
- Ing. Michela Lanchi (ENEA), referente della linea di ricerca "Sistemi di riscaldamento elettrico a microonde dei sali fusi per l'ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER";
- Dott. Vincenzo Sabatelli (ENEA), referente della linea di ricerca "Sistemi di accumulo termico stagionali, di tipo termo-chimico a zeoliti, alimentabili da CST";
- Dott.ssa Anna Castaldo (ENEA), referente della linea di ricerca "Sensori di sporcamento/failure degli specchi per la digitalizzazione del campo solare degli impianti CSP/CST";
- Ing. Giuseppe Petroni (ENEA), referente della linea di ricerca "Diagnosi a ultrasuoni per la rilevazione di occlusioni solide nel piping di impianti CSP/CST utilizzando miscele di sali fusi come fluido termovettore";
- Prof. Marco Binotti (PoliMI), referente della linea di ricerca "Analisi delle potenzialità degli impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER per la decarbonizzazione dell'industria" e referente per il co-beneficiario "Politecnico di Milano";
- Prof. Alessandro Galia (UniPA), referente della linea di ricerca "Studio concettuale dell'utilizzazione di calore solare da impianti a concentrazione per la valorizzazione di matrici organiche residuali mediante processi pirolitici e coproduzione di elettricità" e referente del co-beneficiario "Università degli Studi di Palermo";
- Ing. Walter Gaggioli (ENEA), referente dell'affidatario "Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile";
- Prof. Rosario Aniello Romano (UniNA), referente del co-beneficiario "Università degli Studi di Napoli Federico II";
- Prof. Maurizio De Lucia (UniFI), referente del co-beneficiario "Università degli Studi di Firenze";
- Prof. Roberto Zanino (PoliTO), referente del co-beneficiario "Politecnico di Torino".

In merito alla possibilità di includere figure terze o tecnici esterni nel CdC per una supervisione indipendente delle performance tecnologiche del Progetto, sulla base dell'esperienza del precedente triennio e di quanto generalmente previsto nell'ambito dei Progetti della Ricerca di Sistema, allo stato attuale non si ritiene di ricorrere a competenze esterne. Tuttavia, si evidenzia che la possibilità di ricorrere a competenze esterne all'affidatario ENEA e alle Università co-beneficarie non è esclusa a priori: laddove nel corso dell'espletamento delle attività progettuali si ritenesse che è opportuno, se non necessario, ricorrere a dette competenze esterne per una migliore attività di supervisione del Progetto, saranno attivati contratti ad hoc (costi di cat. D) ad oggi, comunque, non previsti nel budget preventivo di Progetto. In conclusione, si rileva che una supervisione indipendente delle performance tecnologiche del Progetto è, comunque, implicitamente prevista in quanto, analogamente a quanto avvenuto nel precedente triennio, è certa la partecipazione del Progetto (e, in particolare, di taluni componenti del CdC) a tutta una serie di incontri con gli stakeholder (in primis industriali) nell'ambito dei quali, tra l'altro, saranno presentati e discussi i risultati/prodotti intermedi e finali della ricerca di Progetto, ricevendo riscontro sulla

loro innovatività ed efficacia da figure terze con competenze specifiche di settore.

### 3. PROPOSTA DI COORDINAMENTO

La pregressa esperienza maturata dall'affidatario e dai co-beneficiari, con riferimento ai risultati precedentemente ottenuti nell'ambito dei PTR 2019-2021 e PTR 2022-2024 della RdS e/o di numerosi progetti nazionali ed europei, costituisce un'importante base di conoscenza e competenza per l'avvio delle attività di ricerca del Progetto 1.9 "Solare Termodinamico" nell'ambito del PTR 2025-2027 della RdS.

Già in fase di stesura della proposta di Progetto in risposta al tema di ricerca 1.9 "Solare Termodinamico", il capoprogetto, gli indicati referenti di linea di ricerca e i referenti dell'affidatario e dei co-beneficiari (componenti il costituito CdC) si sono approfonditamente confrontati e costantemente coordinati in modo che le attività di ricerca in carico all'affidatario e ai singoli co-beneficiari risultassero prive di sovrapposizioni (all'interno del Progetto e con altri Progetti del PTR 2025-2027) e fossero presenti, invece, collegamenti tra attività di ricerca complementari e sinergiche in modo da valorizzare al massimo, per tutta la durata del Progetto 1.9, le diverse e specifiche conoscenze, competenze, esperienze pregresse e dotazioni (software, strumentali e impiantistiche) dell'affidatario e dei co-beneficiari.

Su tali basi, il costituito CdC ha il compito di attuare il Piano di Coordinamento che, oltre al coordinamento amministrativo e gestionale, si propone primariamente di realizzare, in fase di esecuzione del Progetto, un efficace coordinamento tecnico-scientifico tra l'affidatario ENEA e le Università co-beneficarie, in modo da sviluppare le attività di ricerca in costante e armonica interazione e sinergia per tutta la durata del Progetto. La finalità ultima è quella di raggiungere, in modo efficiente e con pieno successo, gli obiettivi generali del Progetto 1.9 "Solare Termodinamico", nonché gli obiettivi specifici (risultati/prodotti) di ogni linea di ricerca di Progetto e, specificamente, di ogni linea di attività (LA), in accordo con la tempistica definita dal cronoprogramma.

All'inizio del Progetto, si prevede un primo incontro finalizzato a verificare la possibile condivisione di esperienze che possano essere messe a fattor comune, fin dalle prime fasi del Progetto, nelle attività proposte.

Successivamente, al fine di garantire, per l'intero triennio 2025-2027, l'assenza di eventuali sovrapposizioni (peraltro non preventivate in fase di stesura della proposta di Progetto) tra attività di ricerca, saranno previsti momenti periodici di confronto nel corso dei quali il CdC verificherà lo stato di avanzamento delle attività e valuterà la possibilità di azioni congiunte tra affidatario e co-beneficiari che possano favorire il raggiungimento degli obiettivi generali e specifici del Progetto.

Qualora si dovessero ravvisare eventuali elementi di criticità, anche in riferimento all'accadimento di rischi preventivati nel "Piano di Rischio" del Progetto (di cui al punto "6. Piano di rischio" del capitolato di Progetto) o, a maggior ragione, nel caso d'insorgenza di rischi non preventivabili e/o non preventivati, il CdC potrà coadiuvare i ricercatori impegnati nel Progetto nel valutare l'efficacia delle azioni di mitigazione o le soluzioni del rischio, laddove già individuate e possibilmente prontamente attivate, ovvero dovrà collaborare all'individuazione e a mettere in atto nuove azioni correttive/soluzioni integrative o azioni/soluzioni del tutto nuove e maggiormente efficaci rispetto a quelle già previste/attuate, sfruttando le diverse, variegata e ampie conoscenze, competenze, esperienze in capo a ENEA e alle Università co-beneficarie.

In tale ambito d'intervento, il CdC provvederà a mantenere costantemente aggiornato il "Piano di Rischio", anche in base a eventuali azioni di mitigazione/soluzioni applicate o, in casi limite, a varianti di Progetto che si rendano necessarie.

Oltre alla risoluzione delle suddette criticità, conseguita anche sfruttando le sinergie tra ENEA e Università co-beneficarie, l'opportunità di definire altre azioni congiunte sarà considerata dal CdC nel corso del Progetto in funzione dei risultati conseguiti e del potenziale impatto che tali azioni sinergiche potrebbero apportare al Progetto.

In generale, per attuare un coordinamento tecnico-scientifico efficace, la presente proposta di coordinamento favorisce la comunicazione continua (i) informale nell'ambito del partenariato e (ii) formale con riunioni del CdC, in alcuni casi estese ai ricercatori che lavorano al Progetto (come da calendario/tempistiche delle azioni di coordinamento, di cui al paragrafo seguente). Il CdC garantirà comunque, per tutta la durata del Progetto, il mantenimento di contatti diretti e confronti frequenti tra i ricercatori che sviluppano le diverse attività di ricerca del Progetto.

In ogni caso, la condivisione dei risultati raggiunti nonché di nuove informazioni (direttamente o indirettamente riconducibili alle attività progettuali) costituirà un importante momento di confronto tra affidatario e co-beneficiari, con evidenti benefici per il raggiungimento degli obiettivi del Progetto. Il CdC, in tale ambito, avrà cura di organizzare riunioni periodiche (con le cadenze ipotizzate nel paragrafo successivo) in cui saranno presentati i risultati raggiunti nel corso di Progetto e scambiate ulteriori informazioni.

In conclusione, fatto salvo tutto quanto sopra, il Piano di Coordinamento prevede che il CdC si occupi delle seguenti azioni di coordinamento tecnico-scientifico:

- monitoraggio continuo dell'attuazione del "piano di lavoro" del Progetto (di cui al punto "3.1 Descrizione del piano di lavoro" del capitolato di Progetto) e, in particolare, controllo dello stato di avanzamento delle linee di ricerca e delle linee di attività (LA) in cui queste si sviluppano;
- rapida rilevazione delle deviazioni dal piano di lavoro causate dall'insorgere di criticità/occorrenza di rischi e valutazione dell'efficacia delle misure di mitigazione/soluzioni, individuazione di nuove azioni di mitigazione/soluzioni (sfruttando la sinergia derivante dalle diverse, variegata e ampie conoscenze, competenze, esperienze in capo all'affidatario e ai co-beneficiari), valutazione dei risultati della gestione del rischio e aggiornamento del "Piano di Rischio";

- favorire la condivisione dei risultati della ricerca tra l'ENEA e le Università co-beneficarie e tra i ricercatori coinvolti nel Progetto;
- monitoraggio del raggiungimento dei risultati attesi nonché del completamento dei prodotti della ricerca (con caratteristiche tecniche conformi a quelle target stabilite) e dell'integrazione complessiva di tali risultati/prodotti per concorrere al raggiungimento degli obiettivi specifici delle diverse linee di ricerca e degli obiettivi generali del Progetto.

Le verifiche tecnico-scientifiche prevederanno momenti di confronto tra partner di Progetto secondo le tempistiche e modalità definite nel "calendario/tempistiche delle azioni di coordinamento" riportato nel seguente paragrafo.

#### 4. CALENDARIO/TEMPISTICA DELLE AZIONI DI COORDINAMENTO

Le azioni di coordinamento del CdC, di cui alla proposta di coordinamento del precedente paragrafo, saranno esplicitate, ordinariamente, mediante riunioni periodiche di cui si riporta di seguito una ipotesi di calendario preliminare.

Le riunioni potranno avvenire "in remoto" (modalità ordinaria) o "in presenza" (laddove necessario o preferibile). A seguito di ogni riunione è prevista la redazione del relativo verbale.

Data: M1 - Tipo: Riunione CdC

Oggetto della riunione:

- Riunione di inizio Progetto per condivisione di esperienze acquisite nell'ambito di precedenti PTR e/o altri progetti, che possano essere messe a fattor comune fin dalle prime fasi della ricerca.

Data: M12 - Tipo: Riunione CdC

Oggetto della riunione:

- Riunione preliminare in vista dell'inizio (M13) delle linee di attività in carico alle Università co-beneficarie
- Condivisione e revisione critica dei risultati della ricerca
- Valutazione avanzamento attività di ricerca
- Valutazione e attuazione azioni di coordinamento

Data: M18 - Tipo: Riunione CdC estesa ai ricercatori coinvolti nel Progetto

Oggetto della riunione:

- Presentazione di attività/resultati/prodotti da parte dei referenti delle linee di ricerca e/o di loro delegati
- Condivisione e revisione critica dei risultati intermedi della ricerca
- Valutazione avanzamento attività di ricerca
- Valutazione e attuazione azioni di coordinamento
- Perfezionamento azioni in essere per emissione SAL intermedio di Progetto

Data: M27 - Tipo: Riunione CdC

Oggetto della riunione:

- Condivisione e revisione critica dei risultati della ricerca
- Valutazione avanzamento attività di ricerca
- Valutazione dello stato della diffusione dei risultati della ricerca e delle azioni di comunicazione/disseminazione da intraprendere nell'ultima parte del triennio di Progetto
- Valutazione e attuazione azioni di coordinamento

Data: M36 - Tipo: Riunione CdC estesa a ricercatori coinvolti nel Progetto

Oggetto della riunione:

- Presentazione di attività/resultati/prodotti da parte dei referenti delle linee di ricerca e/o di loro delegati
- Condivisione e valutazione dei risultati finali della ricerca, con particolare riferimento al raggiungimento degli obiettivi specifici delle linee di ricerca (resultati/prodotti) e degli obiettivi generali del Progetto
- Perfezionamento azioni in essere per emissione SAL finale di Progetto

Per quanto attiene alle verifiche intermedie (con condivisione e revisione critica dei risultati della ricerca) da effettuare nel corso delle suddette riunioni periodiche del CdC, si ritiene di evidenziare che, come d'uso per i Progetti della Ricerca di Sistema, nel capitolato del Progetto 1.9 non sono state previste milestone intermedie con produzione di deliverable tecnici ulteriori rispetto ai risultati/prodotti da rendere disponibili al termine delle linee di attività (LA). Pertanto, i risultati/prodotti delle LA rimangono i deliverable tecnici da sottoporre a valutazione da parte del CdC con riferimento al soddisfacimento degli elementi quali-quantitativi per i test di verifica, specificati nella sezione "4. Tabella riassuntiva prodotti della ricerca ed elementi di verifica del Progetto" del capitolato di Progetto. Oltre alle suddette riunioni periodiche di cui alla precedente ipotesi di calendario preliminare, il lavoro del CdC prevede, per tutto il periodo di realizzazione del Progetto, continui scambi di informazioni tra i componenti del CdC relativi all'andamento delle attività di ricerca.

Inoltre, per un'efficace e continua azione di coordinamento finalizzata a mantenere allineati l'avanzamento delle attività, la realizzazione del piano di spesa, il conseguimento dei risultati e il rilascio dei prodotti della ricerca rispetto a quanto previsto dal capitolato tecnico del Progetto (comprensivo del Gantt), i referenti di ogni linea di ricerca riferiscono al capoprogetto con cadenza almeno bimestrale a partire

dall'inizio di ogni linea di ricerca.

In caso di occorrenza di un rischio per cui le azioni di mitigazione/soluzioni previste non risultassero efficaci ovvero in caso di occorrenza di un rischio non preventivabile e/o non preventivato, a seguito dell'interlocuzione con il referente della linea di ricerca affetta da tale rischio, il capoprogetto convocherà immediatamente il CdC in riunione straordinaria. Il CdC, al fine di risolvere le criticità rilevate dal capoprogetto, provvederà a promuovere una rapida azione di coordinamento atta a sfruttare le sinergie derivanti dalle diverse, variegata e ampie conoscenze, competenze, esperienze in capo a ENEA e alle Università co-beneficiarie con la finalità di addivenire, in tempi rapidi, alla mitigazione/soluzione del rischio.

Ulteriori riunioni del CdC (oltre quelle schedate secondo l'ipotesi di calendario preliminare sopra riportata e a quelle straordinarie convocate per risolvere eventuali criticità dovute a rischi occorsi in fase di esecuzione del Progetto) saranno convocate laddove si dovesse palesare la necessità o la convenienza di nuove azioni di coordinamento atte a sviluppare le attività di ricerca progettuali in costante sinergia tra affidatario e co-beneficiari.

## 2.7 Impatto sul sistema energetico e benefici attesi

### a) Impatto e benefici sul sistema energetico

Le valutazioni in merito all'impatto e ai benefici sul sistema energetico derivanti dai risultati attesi nell'ambito del Progetto 1.9 "Solare Termodinamico" del PTR 2025-2027 della Ricerca di Sistema elettrico (RdS) sono coerenti e in continuità con quelle dell'analogo Progetto dei due precedenti trienni (2019-2021 e 2022-2024) della RdS. Inoltre, la maggiore maturità tecnologica di talune soluzioni tecniche che saranno sviluppate in linee di ricerca che prendono direttamente spunto da risultati conseguiti nel precedente triennio della RdS, nonché la presenza di linee di ricerca completamente nuove, ovvero di linee di ricerca basate su soluzioni innovative e migliorative rispetto a quelle sviluppate nel precedente triennio e allo stato dell'arte della tecnica, consentiranno di amplificare l'impatto e i benefici sul sistema energetico.

Peraltro, lo scenario di riferimento (europeo e nazionale) in cui è stato concepito il Progetto richiede, rispetto ai precedenti trienni, un sempre maggior impegno rispetto agli obiettivi di decarbonizzazione del sistema energetico nazionale.

Il "Green Deal europeo" mira a rendere l'Europa il primo continente a impatto climatico zero entro il 2050 con iniziative e misure finalizzate a "riprogrammare" l'intero sistema energetico, che è responsabile, tra la produzione e l'utilizzo di energia, del 75% delle emissioni globali di gas serra dell'UE. In questo contesto diventa prioritario lo sviluppo di sistemi e tecnologie che consentano una rapida decarbonizzazione del sistema energetico italiano garantendo, allo stesso tempo, energia sicura e conveniente per i consumatori. Nel settore elettrico, nel corso degli ultimi anni, sono stati registrati progressi significativi nella decarbonizzazione della produzione; tuttavia, esistono ancora numerosi ostacoli che impediscono al settore civile e industriale di abbracciare alternative energetiche più pulite. Una delle principali barriere è rappresentata dalla mancanza di tecnologie di sistema che permettano di impiegare, in maniera integrata, più alternative energetiche rinnovabili; tale integrazione dovrebbe coinvolgere diversi settori, non limitandosi solo a quello elettrico, e dovrebbe includere anche la poligenerazione distribuita.

Tra le tecnologie da fonti energetiche rinnovabili (FER), il solare a concentrazione, termodinamico e termico, accoppiato ad efficienti accumuli termici (TES - Thermal Energy Storage), poco costosi e senza particolari limitazioni di capacità o durata, può svolgere un ruolo chiave nel contesto dell'integrazione energetica intelligente e della decarbonizzazione dei processi e sistemi energetici. Nelle applicazioni su larga scala, i sistemi solari a concentrazione accoppiati ad accumuli termici possono aiutare a risolvere i problemi di stabilità della rete elettrica nazionale in presenza di elevati livelli di penetrazione delle FER non programmabili, mentre nelle applicazioni di media-piccola scala possono essere impiegati per integrare le fonti rinnovabili presenti sul territorio nella produzione di vettori energetici e possono contribuire alla poligenerazione distribuita anche nei settori produttivi dove la decarbonizzazione è più difficile.

Infatti, è noto come l'energia termica generata e accumulata da un impianto solare a concentrazione possa essere impiegata tal quale (impianti solari a concentrazione termici o CST - Concentrated Solar Thermal) o convertita in elettricità (impianti solari a concentrazione termodinamici o CSP - Concentrated Solar Power). In particolare, l'energia termica può:

- essere utilizzata direttamente per fornire calore di processo all'industria (applicazioni SHIP - Solar Heat Industrial Processes), alimentare processi endotermici di produzione di solar fuels o alimentare sistemi energetici decentralizzati che assorbono energia termica ed elettrica (solar heating & cooling, cogenerazione distribuita, comunità energetiche);
- essere convertita in energia elettrica "dispacciabile" che, immessa in rete, permetta di superare alcune criticità inerenti alla gestione di un sistema energetico sempre più basato sulle tecnologie da fonti energetiche rinnovabili non programmabili, quali fotovoltaico (PV) ed eolico.

Gli impianti CSP/CST possono contribuire alla transizione energetica di settori industriali e civili ritenuti "difficili da decarbonizzare", attualmente serviti da tecnologie energetiche convenzionali utilizzando combustibili fossili, attraverso la co-fornitura di calore a bassa, media e alta temperatura e di elettricità. In particolare, tra le tecnologie del solare a concentrazione i sistemi mini-CSP/CST e, soprattutto, micro-CSP/CST si prestano particolarmente allo scopo, potendo essere inseriti, a livello locale e anche in contesti fortemente antropizzati, nel "district heating" contribuendo significativamente alla riduzione dei consumi di gas nei settori industriali e civili.

Grazie ai sistemi TES, che, a differenza dei BESS (Battery Energy Storage System) non fanno uso di materiali strategici, i sistemi CSP ibridi (ossia integrati con altre tecnologie FER) offrono la possibilità di combinare i bassi costi di generazione dell'energia elettrica da tecnologie FER più mature (PV ed eolico, in primis) con la possibilità del CSP di fornire elettricità in modo stabile e programmabile (anche in assenza della fonte primaria), permettendo di massimizzare l'immissione di energia rinnovabile nella rete elettrica e preservando, al contempo, la stabilità e l'affidabilità della rete. In aggiunta, il CSP può favorire la graduale decarbonizzazione delle centrali termoelettriche convenzionali attraverso l'integrazione o la sostituzione della caldaia a combustibili fossili degli impianti termoelettrici, in una logica di retro-fitting delle centrali.

Le considerazioni sopra riportate connotano il CSP/CST come una tecnologia FER a servizio del sistema energetico nazionale e delle altre tecnologie da fonti rinnovabili aleatorie. Coerentemente con questa visione, nel "Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC)" il solare a concentrazione è inserito tra i cluster di tecnologie energetiche che si ritiene possano rivestire un ruolo importante nel raggiungimento degli obiettivi, fissati sia al 2030 che al 2050, per quanto riguarda la decarbonizzazione del sistema energetico e dei processi, la diffusione della generazione distribuita e la sicurezza energetica. Obiettivi che, alla luce del pacchetto "Fit for 55" e del piano "REPowerEU", sono stati aggiornati nel PNIEC trasferito alla Commissione Europea a luglio 2024, rispetto alla versione del PNIEC approvato nel 2019, sia per quanto riguarda la percentuale di consumi lordi di energie rinnovabili (elettriche e termiche), sia per quanto riguarda quelli che si intersecano con il tema della mitigazione climatica e, conseguentemente, con la riduzione delle emissioni di gas serra da parte di tutti i settori.

L'approccio del PNIEC è di promuovere sinergie virtuose tra il settore elettrico e comparti diversi ("sector integration") come il riscaldamento, il raffreddamento, la mobilità o i processi industriali, comunità urbane, il tutto con l'obiettivo di favorire la massiccia penetrazione delle rinnovabili nel mix energetico. In particolare, il target al 2030 individuato dal PNIEC è di una quota complessiva del 39,4% di rinnovabili sui consumi finali lordi (settore elettrico, termico e trasporti). In merito al settore elettrico, secondo gli obiettivi del PNIEC, il parco di generazione elettrica subirà una importante trasformazione grazie al "phase out" della generazione da carbone e alla promozione dell'ampio ricorso alle FER; il maggiore contributo alla crescita delle rinnovabili deriverà proprio dal settore elettrico, con una quota dei consumi complessivi nazionali di energia elettrica coperta da fonti rinnovabili, al 2030, pari al 63,4%; con riferimento alle tecnologie FER con significativo potenziale innovativo (eolico offshore, PV floating, agrivoltaico, solare termodinamico, energie marine e geotermia avanzata) si intende realizzare una capacità aggiuntiva di oltre 5 GW, di cui 80 MW da solare a concentrazione (che è il contingente di potenza messo a disposizione nel periodo 2024-2028 dal "Decreto FER 2", richiamato nel seguito). In merito al settore termico, è richiesto un cambiamento tecnologico deciso verso soluzioni che favoriscano la penetrazione delle fonti rinnovabili, con un target al 2030 per la quota dei consumi complessivi di energia per riscaldamento e raffrescamento coperta da FER pari al 35,9%; in quest'ambito, il solare termico potrà rivestire un ruolo crescente in sistemi integrati di produzione di calore efficiente e rinnovabile, come ad esempio i sistemi ibridi e l'integrazione in impianti di teleriscaldamento, anche attraverso la promozione di accumuli stagionali. Infine, per il settore dei trasporti, la quota dei consumi complessivi di energia coperta da fonti rinnovabili è pari al 34,2%. Per realizzare questi ambiziosi obiettivi, da una prima elaborazione, considerando il sistema energetico nazionale (senza considerare le infrastrutture di trasporto), si stima che, nel periodo 2024-2030, occorran oltre 174 mld€ di investimenti aggiuntivi cumulati per realizzare gli obiettivi dello scenario PNIEC rispetto allo scenario a politiche correnti (pari a un incremento del 27% nel periodo considerato), di cui 35,7 mld€ nel settore elettrico per impianti di generazione da tecnologie FER, con 0,8 mld€ per il solare termodinamico.

Nell'ambito della "dimensione della ricerca, dell'innovazione e della competitività" del PNIEC, tra gli strumenti/politiche nel medio periodo (fino al 2030) è evidenziata l'importanza della Ricerca di Sistema elettrico. In particolare, per la RdS post 2024, il PNIEC rileva che lo schema del Piano Triennale 2025-2027 (sottoposto a consultazione pubblica conclusasi a maggio 2024) è allineato con gli obiettivi generali espressi in campo europeo nello "Strategic Energy Technology (SET) Plan" e nel programma "Horizon Europe", oltre ad essere coerente con le indicazioni del pacchetto Fit-for-55 e le misure individuate dal REPowerEU.

In considerazione di quanto sopra, le attività di ricerca del Progetto 1.9 "Solare Termodinamico" proposte per il triennio 2025-2027 della RdS sono state definite in coerenza con le attività R&I prioritarie dell'"Updated (2023) CSP/CST Implementation Plan (IP) del SET Plan" con particolare riferimento a quelle di seguito riportate:

Area 1. Line-focus solar power plants technology

- Activity 1.1: Component development, process innovation and cost optimization for molten salts systems

Area 3. Reliable and cost-effective heat transfer medium and high-temperature thermal storage systems

- Activity 3.1: Single molten salt thermocline
- Activity 3.2: Next generation of Thermal Energy Storage technologies

Area 5. Medium-and high temperature systems for industrial solar heat applications

- Activity 5.1: Medium temperature systems for industrial solar heat applications

Area 7. Cross-cutting issues

- Activity 7.1: Digitalization of CSP plants for a more efficient monitoring, operation and maintenance
- Activity 7.2: Innovative coatings for CSP mirrors
- Activity 7.3: Reliable CSP, PV and other renewables integration
- Activity 7.4: Promoting the utilization of CSP with thermal storage to facilitate variable RE penetration in the electrical system

In quest'ambito, l'obiettivo della ricerca è quello di sviluppare tecnologie di prodotto e processo utili ad agevolare la transizione

energetica e a favorire il contesto in cui si dovranno inserire queste innovazioni. In questo senso le ricerche proposte si trovano in perfetta sintonia con i temi sviluppati nei progetti europei di “Horizon Europe”, i programmi e le attività da attuare nell’ambito di “Mission Innovation”, con particolare riferimento al “Green Powered Future Mission (GPFM)” (finalizzato alla realizzazione di ricerche e sperimentazioni nelle aree strategiche delle energie rinnovabili, dello stoccaggio dell’energia, della digitalizzazione della rete).

L’impatto atteso sul sistema energetico dei risultati delle attività di ricerca proposte (con particolare, ma non esclusivo, riferimento ai benefici in termini di incremento della penetrazione nel sistema energetico delle tecnologie FER, supporto alla transizione sostenibile e decarbonizzazione del sistema energetico e dell’industria, contributo all’adeguatezza, economicità e sicurezza degli approvvigionamenti energetici, decarbonizzazione in settori industriali energivori e nella climatizzazione degli ambienti e disponibilità di sistemi energetici completamente rinnovabili con produzione h24) recepisce le esigenze delineate dal piano “REPowerEU” risultando coerente con l’Azione “Accelerare la diffusione dell’energia pulita” e le Misure a medio termine su “Energia pulita” e “Industria pulita” del piano.

Con riferimento al “Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR)”, le attività proposte sono coerenti con i seguenti obiettivi generali della “Missione 2: Rivoluzione verde e transizione ecologica” – “Componente 2 - Energia rinnovabile, idrogeno, rete e mobilità sostenibile” (M2C2): (i) incremento della quota di energia prodotta da fonti di energia rinnovabile (FER) nel sistema, in linea con gli obiettivi europei e nazionali di decarbonizzazione; (ii) sviluppo di una leadership internazionale industriale e di ricerca e sviluppo nelle principali filiere della transizione. In particolare, le attività proposte sono state individuate anche considerando specifiche misure (investimenti e riforme) previste negli ambiti di intervento corrispondenti ai suddetti obiettivi generali della componente M2C2 del PNRR, con riferimento a:

- “Investimento 1.2 - Promozione rinnovabili per le comunità energetiche e l’autoconsumo”, “Investimento 1.3 - Promozione impianti innovativi (incluso off-shore)” e “Riforma 1.1 – Semplificazione delle procedure di autorizzazione per gli impianti rinnovabili onshore e offshore, nuovo quadro giuridico per sostenere la produzione da fonti rinnovabili e proroga dei tempi e dell’ammissibilità degli attuali regimi di sostegno”, nell’ambito di intervento “1. Incrementare la quota di energia prodotta da fonti di energia rinnovabile”;
- “Investimento 5.1 - Rinnovabili e batterie”, nell’ambito di intervento “5 Sviluppare una leadership internazionale industriale e di ricerca e sviluppo nelle principali filiere della transizione”.

Si evidenzia, la particolare rilevanza della soprammenzionata “Riforma 1.1” per la diffusione degli impianti CSP/CST sul territorio nazionale e per favorire l’implementazione negli impianti CSP/CST di alcune delle innovazioni attese delle attività di ricerca proposte (con particolare, ma non esclusivo, riferimento alle soluzioni per l’accumulo e l’ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER “elettriche”).

Infine, le attività di ricerca proposte hanno considerato e sono coerenti con i requisiti specifici per gli impianti solari termodinamici (dotazione di accumulo termico e utilizzo come fluido termovettore e di accumulo di sostanze/preparati a basso impatto ambientale, non tossici né nocivi) per l’accesso agli incentivi previsti dallo schema del “Decreto FER 2” approvato dalla Commissione Europea, finalizzato a sostenere la produzione di energia elettrica di impianti a fonti rinnovabili innovativi o con costi di generazione elevati. Tale schema che, peraltro, prevede l’incentivazione di impianti solari termodinamici anche ibridi, mette a disposizione un contingente di potenza complessivo di 80 MW tra il 2024 e il 2028 per gli impianti CSP, di cui 5 MW per gli impianti CSP di piccola taglia ( $P \leq 300$  kW), che ben si adattano alla realtà del territorio nazionale e per i quali è possibile ipotizzare uno sviluppo tecnologico futuro (anche con il contributo delle attività di ricerca proposte) a fronte di una riduzione dei costi, e stabilisce tariffe di riferimento a scalare (da 300 a 200 €/MWh) in funzione della taglia d’impianto, con tariffe più favorevoli per gli impianti CSP di taglia piccola ( $1 < P \leq 300$  kW) e media ( $300 < P \leq 5.000$  kW) rispetto a quelli di grande taglia ( $5.000 < P \leq 15.000$  kW). Aspetto fondamentale è che, per accedere alle incentivazioni, gli impianti solari termodinamici devono essere dotati di sistema di accumulo termico (con capacità nominale di accumulo variabile in funzione della superficie del campo solare) e non devono utilizzare come fluido termovettore, né come mezzo di accumulo, sostanze e preparati classificati come molto tossici, tossici e nocivi. Chiaramente, il presente Progetto 1.9 “Solare Termodinamico” prevede di sviluppare tutta una serie di soluzioni tecniche e tecnologiche che recepiscono gli indirizzi del “FER 2”.

Le considerazioni sopra espone, funzionali anche a chiarire quanto sarà discusso nelle prossime sezioni “Benefici per gli utenti” e “Previsione delle ricadute applicative”, evidenziano che nella stesura del Progetto 1.9 “Solare Termodinamico” sono state considerate le indicazioni di alcuni tra i più importanti dispositivi comunitari e nazionali, alcuni specifici per il settore del CSP/CST, per garantire che il Progetto (i) possa avere un impatto concreto sul sistema energetico (con particolare ma non esclusivo riferimento a quello elettrico), (ii) possa apportare benefici agli utenti e (iii) contribuisca a mantenere e rafforzare la competitività dell’industria italiana di settore, anche creando le condizioni affinché la partecipazione dell’industria e dei centri di ricerca nazionali ai futuri programmi di ricerca (previsti dal SET Plan, Horizon Europe e da Mission Innovation) sia ampia e converga su obiettivi comuni e condivisi.

Con riferimento all’impatto sul sistema energetico dei risultati attesi delle attività di ricerca proposte, in una prospettiva di medio-lungo termine, il Progetto 1.9 “Solare Termodinamico” nel suo complesso intende:

- Perseguire, attraverso l’efficace ibridizzazione tra impianti CSP (dispacciabilità, basso costo di accumulo) e altre tecnologie FER quali PV ed eolico (basso costo di generazione dell’elettricità), un incremento della penetrazione nel sistema energetico delle tecnologie FER riducendo, al contempo, le criticità dovute alle fluttuazioni delle fonti primarie che hanno impatti significativi su complessità di gestione, disservizi, costi e sicurezza della rete elettrica.
- Favorire l’erogazione di servizi ancillari al sistema elettrico attraverso l’operatività di impianti CSP ibridizzati con altre tecnologie FER.
- Supportare la transizione sostenibile e decarbonizzazione del sistema energetico e dell’industria.
- Contribuire all’adeguatezza, economicità e sicurezza degli approvvigionamenti energetici.

- Contribuire alla decarbonizzazione in settori industriali energivori (applicazioni SHIP) e nella climatizzazione degli ambienti (solar heating & cooling).
- Sviluppare componenti e sistemi energetici rinnovabili per comunità energetiche anche in contesti urbani.
- Rendere disponibili sistemi energetici completamente rinnovabili con produzione h24.
- Contribuire alla riduzione dell'impatto ambientale del sistema energetico.

Di seguito si riportano l'impatto e i benefici sul sistema energetico per ogni linea di ricerca del Progetto, inserita nell'ambito della tematica scientifico-applicativa di riferimento.

Tematica "sistemi di accumulo termico per impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER e per la fornitura di energia su base stagionale":

- Con riferimento alla linea di ricerca sulla "comparazione sperimentale tra sistemi di accumulo termico, di tipo termocline a sali fusi, per l'ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER", la presenza di sistemi di accumulo termico dota gli impianti CSP di una notevole flessibilità operativa, consentendo loro di disaccoppiare la produzione di energia elettrica dalla disponibilità della risorsa primaria. Questa caratteristica li rende complementari ad altre tecnologie FER, come il fotovoltaico e l'eolico, permettendone quindi l'integrazione e contribuendo, in questo modo, a massimizzare l'immissione di energia rinnovabile nella rete elettrica e, contestualmente, a stabilizzarla e a ridurre i disservizi legati alle fluttuazioni di produzione.
- Per la linea di ricerca sui "sistemi di riscaldamento elettrico a microonde dei sali fusi per l'ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER", la tecnologia a microonde ha il potenziale di convertire, in modo flessibile ed efficiente, l'energia elettrica in surplus prodotta da altre FER (es. PV) e di accumularla nei sistemi di stoccaggio termico degli impianti CSP utilizzando miscele di sali fusi. Tali sistemi di accumulo si caratterizzano per una maggiore scalabilità rispetto alle batterie elettriche e per l'utilizzo di un materiale a basso costo, non critico dal punto di vista della reperibilità e dell'impatto ambientale. Lo sviluppo della tecnologia a microonde per il riscaldamento dei sali fusi potrà quindi contribuire significativamente alla riduzione delle fluttuazioni nella produzione di energia da FER, stabilizzando la rete, e al raggiungimento degli obiettivi di decarbonizzazione previsti dal Green Deal.
- Per la linea di ricerca sui "sistemi di accumulo termico stagionali, di tipo termo-chimico a zeoliti, alimentabili da CST", lo sviluppo di sistemi di accumulo termo-chimico a zeoliti, anche per uso stagionale, da destinarsi principalmente ad applicazioni distribuite a media temperatura ( $T < 250\text{ °C}$ ) del CST per la climatizzazione degli ambienti (solar heating & cooling) e per la produzione di calore di processo per usi industriali, nonché al recupero e valorizzazione del calore di scarto proveniente da processi termici convenzionali, può contribuire, prospetticamente, alla decarbonizzazione del sistema energetico riducendo il ricorso a combustibili fossili, ovvero il prelievo di energia elettrica dalla rete, per l'impiego nelle suddette applicazioni.

Tematica "materiali e dispositivi per il monitoraggio degli impianti CSP/CST e l'innovazione dei processi O&M":

- Con riferimento alla linea di ricerca sui "sensori di sporco/failure degli specchi per la digitalizzazione del campo solare degli impianti CSP/CST", la disponibilità di sensori innovativi integrati nei rivestimenti autopulenti delle superfici riflettenti determinerà un impatto considerevole in termini di riduzione dei costi operativi e di manutenzione del campo solare (riduzione del consumo di acqua e potenziale intervento "on demand" di lavaggio degli specchi e/o ripristino dell'operabilità ideale in caso di failure) e, quindi, del costo dell'energia prodotta da CSP/CST. 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.
- Per la linea di ricerca sulla "diagnosi a ultrasuoni per la rilevazione di occlusioni solide nel piping di impianti CSP/CST utilizzando miscele di sali fusi come fluido termovettore", l'implementazione della tecnologia di diagnosi a ultrasuoni rappresenterebbe un salto qualitativo nella gestione delle operazioni degli impianti solari a concentrazione a sali fusi. In particolare, il dispositivo di diagnosi che si vuole rendere disponibile (in forma di prototipo) nell'ambito del Progetto, una volta sviluppato e commercializzato, consentirebbe di identificare la posizione delle occlusioni nel piping degli impianti di scala commerciale con maggiore rapidità, ma avrebbe anche la potenzialità di prevenirne la formazione, consentendo una maggiore e più efficiente stabilità operativa d'impianto, rendendo gli impianti a sali fusi significativamente più affidabili, semplici da gestire e mantenere e, quindi, più attrattivi per gli operatori del mercato energetico. Questo incremento dell'affidabilità potrebbe portare, in una prospettiva di medio-lungo termine, a una maggiore diffusione della tecnologia del solare a concentrazione, favorendo così l'adozione su larga scala degli impianti CSP/CST che utilizzano 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) con evidenti benefici ambientali nei siti presso cui verranno realizzati gli impianti e, più in generale, per il sistema energetico.

Tematica "integrazione degli impianti CSP/CST in sistemi di poligenerazione distribuita asserviti a utenze industriali e civili":

- Con riferimento alla linea di ricerca sui "sistemi di cogenerazione distribuita, alimentati da impianti CSP/CST ibridizzati con PV, asserviti a utenze industriali e civili locali", si premette che le città dell'UE svolgeranno un ruolo cruciale nel raggiungimento della neutralità climatica entro il 2050 (Green Deal). Infatti, le città dell'UE occupano solo il 4% della superficie dell'UE ma ospitano il 75% dei cittadini europei, consumano oltre il 65% dell'energia mondiale e sono responsabili di oltre il 70% delle emissioni globali di CO<sub>2</sub>. Poiché la mitigazione del clima dipende in larga misura dall'azione delle aree urbane, è necessario sviluppare soluzioni in grado di sostenere le città dell'UE nell'accelerare la loro trasformazione verde. Da cui la crescente spinta ad operare attraverso i PED (Positive Energy Districts) e le EC (Energy Communities). L'implementazione di tecnologie integrate potrebbe essere facilitata dall'introduzione di sistemi energetici in grado di gestire efficacemente l'energia a livello comunitario. Lo sviluppo di "solar district heating" apre nuove opportunità per l'applicazione della tecnologia CSP/CST in sistemi energetici con utenze sia termiche che elettriche. Rispetto ai sistemi CSP/CST

tradizionali, le suddette applicazioni del CSP/CST richiedono valori DNI inferiori e, non avendo la necessità di produrre solo energia elettrica, possono essere realizzati con una logica modulare che consente di introdurre economie di scala e, quindi, di ridurre i costi della generazione di energia impiegata dall'utente finale. La cogenerazione, con la sua capacità di produrre simultaneamente energia elettrica e termica, offre straordinarie opportunità per attuare l'integrazione tra le reti elettriche con quelle di "district heating" e processi industriali, e di migliorare l'efficienza complessiva del sistema energetico; l'integrazione della cogenerazione con più fonti rinnovabili promette, inoltre, di ridurre significativamente i costi energetici, grazie all'ottimizzazione dell'uso delle risorse. In questo contesto, al fine di superare potenziali barriere tecnologiche dovuta all'assenza di dimostratori e soluzioni modulari che permettano la scalabilità, nel Progetto sarà analizzato il funzionamento di possibili configurazioni impiantistiche che favoriscano sia l'integrazione di impianti CSP/CST in sistemi di poligenerazione distribuita che la Smart Sector Integration, sarà sviluppato e testato in campo un sistema prototipale di generazione elettrica/termica, alimentato da impianti CSP/CST e PV e allacciato a utenze locali, che consentirà di simulare un caso di cogenerazione distribuita integrato con l'utenza. A causa dell'occupazione di suolo dei sistemi CSP/CST di tipo tradizionale (es. collettori lineari parabolici "standard" con apertura di circa 5,7 m), questi sistemi sono difficili da applicare in ambienti fortemente antropizzati come le aree urbane. Pertanto, lo sviluppo di sistemi micro-CSP/CST integrabili negli edifici apre nuove opportunità per l'applicazione della tecnologia del solare a concentrazione in sistemi energetici di poligenerazione distribuita a servizio di utenze, termiche e/o elettriche, industriali e civili. Rispetto ai collettori termici tradizionali, i micro-CSP/CST riescono a raggiungere livelli termici più elevati, utili per consentire una cogenerazione di energia termica ed elettrica (attraverso, ad esempio, i sistemi ORC). In tale ambito, nel Progetto è prevista la prosecuzione delle attività di sviluppo di sistemi micro-CSP/CST, basati su un innovativo prototipo di collettore micro-PTC, per applicazioni di cogenerazione distribuita in ambienti fortemente antropizzati. In particolare, la sperimentazione dell'up-grade dell'innovativo sistema micro-PTC proposto da UniFI, che sarà dotato di tubi ricevitori con il nuovo coating solare ENEA a elevate prestazioni fototermiche e alta stabilità, concorrerà a dimostrare l'efficacia e quindi la fattibilità di impianti micro-CSP/CST per la generazione distribuita di energia con impatto ambientale minimo rispetto a quello provocato dalle fonti energetiche da combustibili fossili.

- Per la linea di ricerca sull'"analisi delle potenzialità degli impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER per la decarbonizzazione dell'industria", sono ottenibili vantaggi dalla miglior gestione degli impianti FER non dispacciabili (PV, Eolico) presenti in siti industriali (es. tetti fotovoltaici) che possono dissipare nei sistemi di accumulo termico degli impianti CSP/CST l'eccesso di generazione elettrica da rinnovabili senza sovraccaricare la rete elettrica.
- Per la linea di ricerca sullo "studio concettuale dell'utilizzazione di calore solare da impianti a concentrazione per la valorizzazione di matrici organiche residuali mediante processi pirolitici e coproduzione di elettricità", saranno analizzati casi applicativi per l'individuazione di strategie idonee all'integrazione di un impianto solare a concentrazione con processi pirolitici di matrici organiche residuali. Questo studio permetterà di valutare la sostenibilità economica di una strategia per decarbonizzare e rendere più flessibile il sistema energetico nazionale effettuando uno storage chimico del calore solare nel bio-olio di pirolisi delle matrici residuali. Nell'ambito dello studio di integrazione di impianti CSP/CST con processi pirolitici per la valorizzazione energetica di matrici organiche residuali verrà valutata la coproduzione di energia elettrica, che contribuirà all'alimentazione con fonti rinnovabili del sistema energetico.

In merito al contributo positivo dei risultati di Progetto al sistema energetico in termini di miglioramenti ambientali, come richiesto in fase di valutazione del Progetto, si esplicita di seguito se e per quali linee di ricerca del Progetto, inserite nell'ambito delle tematiche scientifico-applicative di riferimento, è prevista una valutazione del ciclo di vita (LCA) o analisi costi-benefici ambientali.

Tematica "sistemi di accumulo termico per impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER e per la fornitura di energia su base stagionale":

- Con riferimento alla linea di ricerca sulla "comparazione sperimentale tra sistemi di accumulo termico, di tipo termocline a sali fusi, per l'ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER", si evidenzia che nei futuri sistemi energetici decarbonizzati con forti penetrazioni di fonti rinnovabili intermittenti, i requisiti di flessibilità saranno maggiori rispetto a quelli dei sistemi tradizionali basati sui combustibili fossili. I recenti casi di black-out verificatisi in Spagna e Francia, hanno evidenziato che sono necessarie nuove tecnologie e configurazioni di sistema per garantire la flessibilità necessaria al bilanciamento dei sistemi energetici. L'implementazione di sistemi di accumulo di energia elettrica nel sistema energetico potrebbe fornire parte della flessibilità richiesta in termini di domanda e produzione, anche se la maggior parte di queste soluzioni di accumulo hanno dimostrato di avere costi relativamente elevati oltre a prevedere l'impiego di materiali critici. I parametri che maggiormente influenzano l'eco-profilo della batteria sono la vita utile, le dimensioni, il processo produttivo, i materiali impiegati per la produzione, oltre che il mix energetico impiegato per alimentare la batteria. Le cosiddette "batterie di Carnot", oltre ad essere realizzate quasi totalmente con materiali non critici e riciclabili, hanno dimostrato di avere un costo relativamente inferiore rispetto alle batterie tradizionali, ma con un'efficienza elettrica ridotta. Nella presente linea di ricerca si mira a sviluppare "Carnot battery" come elementi di impianti CSP/CST in grado di raccogliere contributi da sistemi ibridizzati tra CSP/CST e altre tecnologie FER "elettriche", in primis PV, con possibilità di incrementare l'efficienza elettrica grazie all'integrazione di resistenze elettriche direttamente all'interno del serbatoio di accumulo. L'analisi LCA, in questo caso, oltre ad essere onerosa in termini di risorse non previste a budget, sembra prematura in quanto si basa su dati relativi a materie prime, energia, risorse utilizzate e scarti di prodotti in ogni fase del ciclo di vita; si valuta, infatti, che alcuni di questi dati siano incompleti o inaccurati e, quindi, i relativi risultati dell'analisi LCA potrebbero essere poco attendibili. Nell'ambito del Progetto, si prevede comunque di elaborare delle analisi tecnico-economiche nella linea di ricerca

della terza tematica “analisi delle potenzialità degli impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER per la decarbonizzazione dell’industria” (cui si rimanda), inclusa l’analisi di alcuni indicatori che sono propedeutici allo sviluppo di un’analisi LCA completa da eseguirsi in una fase successiva al presente Progetto.

- Per la linea di ricerca sui “sistemi di riscaldamento elettrico a microonde dei sali fusi per l’ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER”, si evidenzia che la valutazione del ciclo di vita e dei benefici ambientali derivanti dall’utilizzo del riscaldamento elettrico dei sali fusi mediante le microonde non è prevista a causa del basso TRL della linea di ricerca in oggetto. Infatti, nel triennio di Progetto si intende sviluppare la tecnologia partendo da uno stadio di “proof of concept” (TRL 3) e arrivando alla “convalida della tecnologia in laboratorio” (TRL 4), con la definizione delle condizioni operative ottimali per l’utilizzo delle microonde su un dispositivo prototipale su scala di laboratorio, che in termini di design e di scelta dei materiali non è ancora rappresentativo di possibili sistemi commerciali.
- Anche per la linea di ricerca sui “sistemi di accumulo termico stagionali, di tipo termo-chimico a zeoliti, alimentabili da CST”, dato il livello medio-basso del TRL, non è prevista alcuna analisi LCA.

Tematica “materiali e dispositivi per il monitoraggio degli impianti CSP/CST e l’innovazione dei processi O&M”:

- Con riferimento alla linea di ricerca sui “sensori di sporcamento/failure degli specchi per la digitalizzazione del campo solare degli impianti CSP/CST”, non è prevista una valutazione LCA in quanto si ritiene che il TRL finale previsto non sia sufficientemente elevato. D’altronde i benefici ambientali connessi al risparmio di acqua di lavaggio nelle operazioni di manutenzione e ripristino della riflettanza necessaria a garantire la producibilità di energia elettrica, in termini prospettici, possono essere considerevoli.
- Per la linea di ricerca “diagnosi a ultrasuoni per la rilevazione di occlusioni solide nel piping di impianti CSP/CST utilizzando miscele di sali fusi come fluido termovettore”, non sono previste analisi del ciclo di vita o analisi costi-benefici ambientali poiché il TRL è basso.

Tematica “integrazione degli impianti CSP/CST in sistemi di poligenerazione distribuita asserviti a utenze industriali e civili”:

- Con riferimento alla linea di ricerca sui “sistemi di cogenerazione distribuita, alimentati da impianti CSP/CST ibridizzati con PV, asserviti a utenze industriali e civili locali”, si evidenzia che l’Unione Europea (UE) mira a diventare il primo continente climaticamente neutro entro il 2050. La decarbonizzazione del settore energetico è fondamentale per realizzare questa ambizione, dato che la produzione e l’uso di energia rappresentano più del 75% delle emissioni di gas a effetto serra dell’UE. Focalizzandoci sul caso Italia si può osservare che quasi il 75% della popolazione italiana vive in aree urbane (il 30% nei soli capoluoghi di provincia) dove il settore civile assorbe circa il 40% dell’energia totale, principalmente per la gestione energetica degli edifici. La cogenerazione distribuita rappresenta una delle opzioni tecnologiche per incidere in maniera positiva sul raggiungimento degli obiettivi del Green Deal anche nelle aree fortemente antropizzate e, inoltre, presenta ricadute applicative e benefici significativi per le aziende del settore, tra cui la maggiore flessibilità, la riduzione dei costi energetici, la minore dipendenza dalla rete centralizzata e l’opportunità di sviluppare nuovi modelli di business. L’indifferibile processo di transizione verso un sistema energetico completamente decarbonizzato sta ponendo nuove sfide e creando grandi opportunità per la ricerca sulle tecnologie rinnovabili, a cui è richiesto di adattarsi alle risorse e specificità delle diverse aree e contesti (civili e industriali) del territorio nazionale. Sistemi micro-PTC equipaggiati con accumulo termico di lunga durata con un riscaldatore ausiliario di back-up, alimentati da combustibili rinnovabili, rappresentano un’opzione tecnologica che può essere impiegata sul tutto il territorio nazionale dati i valori medi annui di DNI che sono superiori a quelli dei Paesi del Nord Europa che già utilizzano tecnologie simili per congenerare energia termica ed elettrica per i consumi energetici di aree urbane o/e industrie locali. Vale la pena ricordare che il 30% del calore richiesto dall’industria è associabile a processi che richiedono una temperatura inferiore ai 150 °C, mentre il 22% è riferito a processi che richiedono calore con temperatura compresa tra i 150 °C ed i 400 °C, che sono livelli termici compatibili con le attuali tecnologie del CSP/CST. È evidente da questi dati che il solare a concentrazione può contribuire a decarbonizzare la maggior parte dei processi di difficile elettrificazione. Lo sviluppo e validazione di impianti innovativi di cogenerazione distribuita in grado di supportare l’evoluzione del sistema energetico nazionale secondo gli obiettivi della riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub>, della sicurezza dell’approvvigionamento energetico, dell’accettabilità sociale, dell’efficienza energetica, dello sfruttamento delle fonti energetiche rinnovabili al minor costo possibile e del miglioramento delle condizioni ambientali a livello locale in aree residenziali/industrializzate antropizzate fortemente inquinate, contribuisce a sviluppare un know-how energetico-ambientale dei componenti di processo capace di stimolare la nascita nel sistema industriale italiano di una filiera innovativa in grado di competere, nel breve/medio termine, sul mercato internazionale delle energie rinnovabili. Nell’ambito del Progetto 1.9 “Solare termodinamico” dei precedenti PTR 2019-2021 e PTR 2022-2024 della RdS sono stati elaborati una serie di report in cui vengono individuati i settori dove il solare a concentrazione è in grado di produrre energia termica a prezzi competitivi. Nel corso della “Conferenza SolarPACES 2024”, svoltasi a Roma, sono stati presentati degli studi dove già con le tecnologie CST attualmente disponibili sul mercato è possibile fornire energia termica tra 120 e 250 °C per processi industriali con LCOH, in aree tipo Bergamo, tra 4.30 e 4.83 c€/kWh che rappresentano valori competitivi per tutte quelle aziende che, pur essendo non classificate come energivore, hanno elevati costi di approvvigionamento del gas metano. Il discorso è ancora più valido se si pensa che importanti studi economici indicano che anche l’idrogeno potrebbe avere costi maggiori a quelli attuali del gas metano.
- Per la linea di ricerca sull’“analisi delle potenzialità degli impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER per la decarbonizzazione dell’industria”, si evidenzia che l’ottimizzazione tecnico-economica degli impianti ibridi CSP/CST per la cogenerazione di energia elettrica e termica per l’industria (che sarà svolta da PoliMI) terrà conto anche delle emissioni di CO<sub>2</sub> indirette (in ottica LCA) associate alla realizzazione dei vari componenti e del loro smaltimento a fine vita utile. In particolare, le emissioni di CO<sub>2</sub> dirette ed indirette verranno incluse nel problema di ottimizzazione tecnico-economico (massimo NPV) risolto dal codice di ottimizzazione AES-OPT o come costi

(tramite la Carbon tax) oppure come vincoli (imponendo un limite massimo sulle emissioni di CO<sub>2</sub> cumulate). Verranno poi effettuata un'analisi di sensitività per valutare l'effetto sui costi/NPV dei limiti imposti sulle emissioni di CO<sub>2</sub>.

- Per la linea di ricerca sullo "studio concettuale dell'utilizzazione di calore solare da impianti a concentrazione per la valorizzazione di matrici organiche residuali mediante processi pirolitici e coproduzione di elettricità", insita nella valutazione tecnico-economica pianificata è una stima della riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> ottenibile con la sostituzione con calore solare del calore di combustione da metano. Le somme risparmiate per il minore acquisto di combustibile e per le minori emissioni di CO<sub>2</sub> costituiscono elementi di recupero economico ai fini della riduzione del minimum fuel selling price dei tagli liquidi prodotti.

## b) Benefici per gli utenti

I benefici attesi per gli utenti sono legati, in generale, alla disponibilità di una tecnologia CSP/CST con componenti, sistemi e soluzioni tecniche/procedurali innovative per impianti di generazione di energia, elettrica a e termica, anche ibridizzati con altre tecnologie FER, più performanti e con minori spese operative e di manutenzione (O&M), ai fini della riduzione, in una prospettiva di medio-lungo termine, del costo dell'energia per gli utenti e, tenuto conto della specificità del territorio nazionale, dell'impatto in termini di occupazione di suolo. Mediante l'ibridizzazione del CSP con altre tecnologie FER e, in particolare, mediante l'applicazione di innovativi sistemi di accumulo termico "alimentati" da CSP e da elettricità generata da altre FER "elettriche", è possibile massimizzare l'immissione in rete di energia rinnovabile, limitando le criticità dovute alle fluttuazioni delle fonti rinnovabili non programmabili, contribuendo, in prospettiva, alla stabilità e affidabilità della rete elettrica nazionale e del sistema energetico nel suo complesso, con evidenti benefici per gli utenti in termini di costi e qualità dei servizi. In quest'ambito, le attività di ricerca su sistemi di accumulo termico di tipo termocline ibridizzati e su innovativi sistemi di riscaldamento elettrico dei sali fusi puntano a rendere disponibili accumuli termici (per natura poco costosi e senza particolari limitazioni di capacità o durata) compatti, a basso impatto ambientale, con tempi di carica/scarica ridotti, che non facciano uso di materiali strategici e/o di elevato costo, e che possano contribuire significativamente alla riduzione del costo supplementare dell'energia rinnovabile (dovuto al necessario bilanciamento della rete) e a rendere il sistema elettrico più stabile e affidabile. Con riferimento ai benefici per gli utenti delle attività di ricerca proposte, in una prospettiva di medio-lungo termine, il Progetto 1.9 "Solare Termodinamico" nel suo complesso intende:

- Favorire l'accesso da parte degli utenti a un sistema energetico sempre più decarbonizzato, ma con livelli elevati di qualità del servizio (stabilità e affidabilità della rete elettrica nazionale e del sistema energetico nel suo complesso, con riduzione del numero di interruzioni/disservizi).
- Ridurre il costo supplementare dell'energia rinnovabile (dovuto al necessario bilanciamento della rete) con riduzione del prezzo dell'energia per gli utenti.
- Supportare la diffusione delle comunità energetiche rinnovabili.
- Apportare benefici diretti e immediatamente percepibili per gli utenti industriali e civili, sia in termini economici che di limitazione delle emissioni inquinanti locali nei siti di generazione (in particolare se prossimi a contesti antropizzati).
- Ridurre i costi energetici dei processi industriali.
- Incrementare l'impiego delle fonti rinnovabili.
- Promuovere l'integrazione delle comunità energetiche con i processi per la valorizzazione di risorse locali.

Di seguito si riportano i benefici per gli utenti per ogni linea di ricerca del Progetto, inserita nell'ambito della tematica scientifico-applicativa di riferimento.

Tematica "sistemi di accumulo termico per impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER e per la fornitura di energia su base stagionale":

- Con riferimento alla linea di ricerca sulla "comparazione sperimentale tra sistemi di accumulo termico, di tipo termocline a sali fusi, per l'ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER", la ricerca condotta mira, tra l'altro, a ottimizzare le prestazioni del sistema di accumulo termico, di tipo termocline a sali fusi, alimentato da solare a concentrazione e da altra tecnologia FER (in primis fotovoltaico e/o eolico) e, di conseguenza, a massimizzare l'immissione in rete di energia rinnovabile limitando le criticità dovute alle fluttuazioni delle fonti rinnovabili non programmabili e contribuendo, quindi, alla stabilità e affidabilità della rete elettrica nazionale e del sistema energetico nel suo complesso con evidenti benefici, in una prospettiva di medio-lungo termine, per gli utenti in termini di minori costi e migliori servizi.
- Per la linea di ricerca sui "sistemi di riscaldamento elettrico a microonde dei sali fusi per l'ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER", la tecnologia del riscaldamento elettrico dei sali fusi mediante microonde potrà, grazie alla notevole flessibilità operativa introdotta dalla dissipazione elettro-termica di tipo volumetrico, contribuire ad accumulare gli eccessi fluttuanti di elettricità prodotta dalle fonti rinnovabili non programmabili, con evidenti benefici per gli utenti in termini di costi e qualità dei servizi. In particolare, la riduzione delle fluttuazioni permetterà di ridurre il costo supplementare dell'energia rinnovabile, dovuto al necessario bilanciamento della rete, rendendo il sistema elettrico più stabile e affidabile.
- Per la linea di ricerca sui "sistemi di accumulo termico stagionali, di tipo termo-chimico a zeoliti, alimentabili da CST", la disponibilità di sistemi di accumulo innovativi per impianti CST operanti a media temperatura ( $T < 250\text{ °C}$ ) può apportare indubbiamente benefici diretti e immediatamente percepibili per gli utenti finali, sia in termini economici che in termini di riduzione di emissioni inquinanti nei siti di installazione. In questo ambito, lo sviluppo di sistemi di accumulo termo-chimico a zeoliti per uso stagionale può rappresentare un'efficace

alternativa agli accumuli tradizionali per applicazioni distribuite di piccola taglia destinate sia alla climatizzazione degli ambienti (solar heating & cooling) sia alla produzione di calore di processo per utenze industriali.

Tematica “materiali e dispositivi per il monitoraggio degli impianti CSP/CST e l'innovazione dei processi O&M”:

- Con riferimento alla linea di ricerca sui “sensori di sporco/failure degli specchi per la digitalizzazione del campo solare degli impianti CSP/CST”, i benefici per gli utenti del sistema elettrico, derivanti dalla possibilità del sensing distribuito a fini autodiagnostici dell'efficienza degli impianti CSP, sono legati alla considerevole diminuzione delle spese O&M e, quindi, dell'energia elettrica prodotta. La possibilità di gestione da remoto degli impianti solari a concentrazione apre la strada alla condivisione di informazioni col sistema degli stakeholders e fruitori dell'energia prodotta, per una sempre maggiore consapevolezza degli utenti di aspetti legati alle fasi produttive dell'energia di cui sono fruitori. Altro importante beneficio è il risparmio sulla risorsa idrica, bene comune e sempre più prezioso.
- Per la linea di ricerca sulla “diagnosi a ultrasuoni per la rilevazione di occlusioni solide nel piping di impianti CSP/CST utilizzando miscele di sali fusi come fluido termovettore”, l'adozione di dispositivi di diagnosi a ultrasuoni per la rilevazione di occlusioni solide nel piping di impianti solari a concentrazione a sali fusi offre vantaggi significativi non solo in termini di efficacia operativa, ma anche per la continuità di generazione. Questa tecnologia rilevando e potenzialmente prevedendo le occlusioni prima che esse causino interruzioni, potrebbe assicurare una produzione di energia (termica e/o elettrica) costante. Questa continuità operativa è importante per permettere agli impianti CSP di partecipare attivamente a diversi mercati dell'energia elettrica, come MGP (Mercato del Giorno Prima) ed altri mercati di regolazione, dove la capacità di garantire un'erogazione affidabile e costante è premiata con incentivi economici e migliori opportunità di vendita. Un impianto per la produzione di energia elettrica stabile e con un elevato grado di flessibilità e dispacciabilità, qualità che contraddistinguono i sistemi CSP, riduce i rischi associati alla volatilità dei prezzi e migliora la competitività nel mercato elettrico nazionale. Questa efficienza operativa ed affidabilità si traduce in costi energetici più bassi per il mercato nazionale, con benefici non solo per i produttori di energia ma anche gli utenti finali. Infatti, la riduzione dei costi di produzione può essere trasferita, in una prospettiva di medio-lungo termine, agli utenti finali del sistema elettrico nazionale sotto forma di tariffe energetiche più competitive, rendendo gli impianti CSP una scelta ancora più attraente.

Tematica “integrazione degli impianti CSP/CST in sistemi di poligenerazione distribuita asserviti a utenze industriali e civili”:

- Con riferimento alla linea di ricerca sui “sistemi di cogenerazione distribuita, alimentati da impianti CSP/CST ibridizzati con PV, asserviti a utenze industriali e civili locali”, la disponibilità di componenti e tecnologie innovativi per sistemi di cogenerazione distribuita di elettricità/calore, alimentati da impianti CSP/CST ibridizzati con PV, asserviti a utenze industriali e civili locali, può apportare benefici diretti e immediatamente percepibili per gli utenti, sia in termini economici che di limitazione delle emissioni inquinanti nei siti industriali considerati o, più in generale, in contesti antropizzati. In quest'ambito, peraltro, si attendono benefici, nel breve-medio termine, per gli utenti derivanti dall'applicazione e diffusione dell'innovativo sistema micro-CSP/CST con collettore di tipo micro-PTC proposto da UniFI e di cui sarà realizzato un up-grade nell'ambito del Progetto; infatti, avendo il collettore micro-PTC ridotto ingombro e potendo essere integrato in strutture edilizie, il suo impiego offrirà l'evidente vantaggio di poter produrre energia (elettrica e termica) da fonte rinnovabile, con alta efficienza, anche in contesti industriali e civili fortemente antropizzati caratterizzati dalla scarsa disponibilità di spazi.
- Per la linea di ricerca sull'“analisi delle potenzialità degli impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER per la decarbonizzazione dell'industria”, si evidenziano vantaggi per gli utenti industriali, dato l'obiettivo di identificare il miglior mix di generazione per soddisfare le richieste di calore ed elettricità, minimizzando allo stesso tempo i costi associati al processo di decarbonizzazione per tali utenti. L'inclusione nell'analisi di scenari che considerino via via frazioni crescenti della domanda di elettricità/calore coperti da impianti ibridi può consentire, inoltre, all'utente industriale di meglio programmare il suo percorso verso la totale decarbonizzazione.
- Per la linea di ricerca sullo “studio concettuale dell'utilizzazione di calore solare da impianti a concentrazione per la valorizzazione di matrici organiche residuali mediante processi pirolitici e coproduzione di elettricità”, gli obiettivi perseguiti sono volti al raggiungimento di un maggiore stato di avanzamento dello sviluppo di tecnologie sostenibili economicamente per la valorizzazione energetica di differenti tipologie di matrici organiche residuali. Le migliori strategie di accoppiamento tra processo pirolitico e impianto solare a concentrazione verranno formulate analizzando anche lo scenario di coproduzione di energia elettrica da immettere nel sistema elettrico nazionale. Tali strategie permetteranno anche di promuovere l'integrazione delle comunità energetiche con i processi per la valorizzazione di matrici organiche residuali locali.

### c) Previsione delle ricadute applicative

Tra le maggiori sfide per la competitività che l'Italia deve affrontare c'è lo sviluppo di un sistema integrato ricerca-industria capace di accelerare l'introduzione sul mercato di nuove tecnologie, prodotti e servizi. In particolare, nell'ambito del Progetto 1.9 “Solare Termodinamico” del PTR 2025-2027 della RdS, in continuità con quanto fatto nel precedente triennio, si prevede di massimizzare l'impatto e i benefici sul sistema Paese diffondendo non solo i risultati concreti delle attività di ricerca (quali materiali, componenti, dispositivi, sistemi, soluzioni tecniche e metodologie avanzate), anche in considerazione delle possibili ricadute applicative e/o dell'industrializzazione di tali risultati su un orizzonte temporale di medio-lungo periodo (ovvero, in alcuni specifici casi, di breve-medio periodo), ma altresì i risultati astratti quali conoscenze, competenze ed esperienze acquisite nel corso delle attività di ricerca. In particolare, il know-how specifico sviluppato e implementato dall'affidatario ENEA e dalle Università co-beneficarie coinvolte nel Progetto potrà essere capitalizzato mediante il trasferimento tecnologico al settore industriale di riferimento, con l'auspicio che i risultati

della ricerca più prossimi all'applicazione possano essere oggetto, in collaborazione con partner industriali, di ulteriore sviluppo e ingegnerizzazione al fine di orientare al meglio le innovazioni prodotte verso i possibili scenari applicativi. È, infatti, importante osservare che il settore del CSP/CST può avvalersi di un tessuto industriale nazionale di aziende che producono, o hanno prodotto fino al recente passato, o sono potenzialmente in grado di produrre (se opportunamente supportate dall'ENEA e dalle Università co-beneficiarie) alcuni componenti chiave degli impianti solari a concentrazione (tubi ricevitori, specchi, collettori solari, sistemi di accumulo, ecc.) e che potrebbero, pertanto, beneficiare dei risultati conseguiti nell'ambito del Progetto, con la prospettiva finale di rafforzare la competitività internazionale dell'intera filiera nazionale (ricerca e industria) di settore. Inoltre, le attività di ricerca e sviluppo proposte nell'ambito del Progetto, assieme alle opzioni applicative studiate e analizzate, prefigurano ricadute positive anche in settori applicativi diversi da quello specifico del CSP/CST, nell'ambito dei quali sarà possibile valorizzare la capacità della filiera produttiva nazionale (principalmente basata sulle Piccole-Medie Imprese, PMI) che, in precedenti esperienze con i partner di Progetto, si è dimostrata potenzialmente in grado di recepire, implementare e industrializzare prodotti/risultati della ricerca a un livello di sviluppo tecnologico sufficientemente avanzato. In quest'ambito è fondamentale l'attività di disseminazione, a cui sono riservate adeguate risorse finanziarie nonché umane nell'ambito del Progetto, rivolta a soggetti specializzati quali gli stakeholder (in primis industriali), la comunità tecnico-scientifica (nazionale e internazionale) e gli interlocutori istituzionali (con particolare riferimento ai Ministeri competenti). L'attività di disseminazione, principalmente finalizzata alla diffusione e trasferimento dei risultati conseguiti nell'ambito del Progetto per favorirne lo sfruttamento e l'applicazione pratica, consentirà anche un efficace riscontro sul valore aggiunto e sull'impatto delle innovazioni perseguite nel corso delle attività di ricerca. Nello specifico, in occasione di workshop tematici, mediante la partecipazione a congressi/conferenze (nazionali e internazionali) e grazie a uno o più eventi di disseminazione, appositamente organizzati nell'ambito del Progetto e a cui saranno invitati gli stakeholder nazionali e rappresentanti dei Ministeri competenti, saranno fornite informazioni di dettaglio aggiornate sullo stato di avanzamento del Progetto, dando ampia visibilità ai risultati originali raggiunti e ai prodotti innovativi della ricerca (con particolare, ma non esclusivo, riferimento a quelle soluzioni ritenute più promettenti dal punto di vista del trasferimento tecnologico e della successiva industrializzazione). Nell'ambito di tali eventi di disseminazione, saranno inoltre discusse le potenziali ricadute sul sistema elettrico/energetico/produttivo nazionale dei risultati e prodotti della ricerca di Progetto e saranno individuate possibili future azioni di ricerca nel settore di riferimento, con l'obiettivo di creare le condizioni affinché la partecipazione dell'industria e dei centri di ricerca nazionali ai futuri programmi di ricerca comunitari sia ampia e converga su obiettivi comuni e condivisi.

Nel contesto descritto, peraltro, l'aumento del costo dell'energia da combustibili fossili, verificatosi a partire dal 2021 e aggravatosi a seguito del conflitto russo-ucraino, rende sempre più necessarie azioni a supporto dell'utilizzo di fonti di energia più accessibili, sicure e sostenibili, e costituisce un importante motivo del rinnovato interesse della comunità nazionale e internazionale per la generazione di energia con impianti solari CSP/CST (che hanno la peculiarità di poter immettere energia rinnovabile in rete in modo "programmabile"). Pertanto, le industrie del settore stanno nuovamente spingendo per sviluppare componentistica più prestazionale, affidabile e a basso costo, nonché per sviluppare soluzioni tecniche e ingegneria di sistema in grado di semplificare la gestione operativa degli impianti CSP/CST, sia tal quali che ibridizzati con altre tecnologie energetiche da fonti rinnovabili (in primis fotovoltaico, ma anche eolico). Le tipologie di "aziende target" per l'attività di trasferimento tecnologico dei risultati e dei prodotti della ricerca del Progetto 1.9 "Solare Termodinamico" sono:

- Aziende manifatturiere in grado di produrre componentistica avanzata per impianti CSP/CST, che possono essere interessate dalle ricadute applicative e/o dall'industrializzazione di risultati/prodotti della ricerca di Progetto su un orizzonte temporale di breve-medio periodo (es. sistemi di accumulo termocline ibridizzati, coating per tubi ricevitori, sistema micro-PTC) o di medio-lungo periodo (es. sistemi di riscaldamento elettrico a microonde dei sali fusi, sistemi di accumulo stagionali di tipo termo-chimico a zeoliti, sensori di sporco/failure per specchi solari, dispositivo di rilevazione a ultrasuoni per impianti CSP/CST a sali fusi).
- EPC Contractor / Società che si occupano di operation di impianti, che possono essere interessate dalle ricadute applicative di soluzioni tecniche e di ingegneria di sistema, sviluppate nel Progetto, in grado di semplificare la gestione degli impianti CSP/CST tal quali o ibridizzati con altre tecnologie FER (es. sensori di sporco/failure prospetticamente idonei per la digitalizzazione del campo solare, dispositivo di rilevazione a ultrasuoni e relative linee guida per il suo l'utilizzo su impianti CSP/CST a sali fusi, procedure operative per sistemi di poligenerazione distribuita asserviti a utenze industriali e civili alimentati da impianti CSP/CST ibridizzati con PV, analisi tecnico-economiche-ambientali e modelli di impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER per sistemi industriali cogenerativi, analisi di fattibilità e schemi di processo per l'accoppiamento tra processi pirolitici e impianti CSP/CST).
- Aziende di settori diversi dal CSP/CST (PV, monitoraggio ambientale di polveri sottili e altri inquinanti, componentistica per climatizzazione solare, refrigerazione industriale, recupero calore di scarto di processi industriali), che possono essere interessate dalle ricadute applicative e/o dall'industrializzazione di taluni specifici risultati/prodotti della ricerca (es. sensori di sporco/failure, sistemi di accumulo termo-chimico a zeoliti).

Di seguito si riportano le ricadute applicative previste e/o la possibile industrializzazione dei risultati e/o i benefici attesi per le aziende di settore per ogni linea di ricerca del Progetto, inserita nell'ambito della tematica scientifico-applicativa di riferimento.

Tematica "sistemi di accumulo termico per impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER e per la fornitura di energia su base stagionale":

- Con riferimento alla linea di ricerca sulla "comparazione sperimentale tra sistemi di accumulo termico, di tipo termocline a sali fusi, per l'ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER", lo sviluppo e l'ottimizzazione di sistemi di accumulo termico alimentabili sia da

CSP/CST che da altre tecnologie energetiche rinnovabili, in primis fotovoltaico (PV), consentiranno di incrementare la frazione di energia (elettricità/calore) prodotta esclusivamente da fonti rinnovabili, contribuendo al tempo stesso alla stabilizzazione della rete elettrica. Tali sistemi di accumulo termico, oltre a garantire un'integrazione più efficiente delle FER nel sistema energetico, potranno essere impiegati in tutti quei numerosi contesti industriali che necessitano di calore di processo, come ad esempio nel settore alimentare, tessile, cartario e in altri comparti produttivi.

- Per la linea di ricerca sui "sistemi di riscaldamento elettrico a microonde dei sali fusi per l'ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER", l'attività di ricerca condotta ha lo scopo di studiare soluzioni tecnologiche per incrementare la flessibilità nel bilanciamento del binomio produzione-domanda, nel contesto di impianti ibridi in cui l'accumulo termico sia alimentato con il calore prodotto da CSP/CST e con la sovrapproduzione di energia elettrica da altre tecnologie FER. Ciò potrà incrementare la competitività dell'intera filiera nazionale (ricerca e industria) del CSP/CST e favorire la creazione di nuove collaborazioni tra aziende operative in settori diversi e complementari, quali aziende sviluppatrici di componenti e materiali per l'accumulo termico, fornitori di sistemi di riscaldamento elettrico, in particolare a microonde, aziende produttrici di componentistica elettrica/elettronica, ecc. Pertanto, le ricadute applicative della presente linea di ricerca sono potenzialmente rilevanti e riguardano, oltre alla filiera del CSP/CST, anche settori come la produzione di macchinari industriali e l'elettronica di potenza. Da un lato, infatti, l'innovazione proposta richiede la realizzazione di componenti standard (generatori di microonde, guide d'onda, sistemi di controllo dell'erogazione di potenza, cavità risonanti) avvalendosi dell'esperienza di aziende specializzate, che possono fornire (e, nel caso, progettare) componenti pronti all'uso. Dall'altro, l'integrazione del sistema riscaldante con un serbatoio d'accumulo richiede opportune modifiche al serbatoio e realizzazione di componenti non standard (come guide d'onda resistenti ad elevate temperature e finestre di contatto con il serbatoio), e ciò richiederà il coinvolgimento di aziende specializzate nella progettazione e nella costruzione di impianti industriali con componenti e design innovativi. Queste realtà economiche trarrebbero beneficio dall'affermazione della tecnologia descritta, che aprirebbe un nuovo settore di mercato.

- Per la linea di ricerca sui "sistemi di accumulo termico stagionali, di tipo termo-chimico a zeoliti, alimentabili da CST", lo sviluppo di sistemi di accumulo termo-chimico a zeoliti, anche di tipo stagionale, da destinarsi ad applicazioni distribuite a media temperatura del CST, potranno trovare ricadute applicative sia nel settore della climatizzazione solare in ambito civile e industriale sia in quello della refrigerazione industriale che beneficerebbero della elevata densità energetica ottenibile, con conseguente riduzione del costo del calore accumulato. In aggiunta, tali sistemi di accumulo innovativi potranno essere utilizzati per aumentare la frazione di energia solare che alimenta processi industriali che richiedono calore a media temperatura (cartiere, lavanderie industriali, caseifici, industrie agroalimentari, ecc.), garantendo una fornitura dispacciabile (ovvero più continua e programmabile) di calore solare a tali processi industriali, con rilevanti risparmi nel lungo periodo anche in relazione a possibili aumenti del costo dei combustibili fossili. Allo stesso tempo tali sistemi di accumulo possono favorire il recupero e la valorizzazione di calore di scarto proveniente da processi termici convenzionali, contribuendo a ridurre il ricorso a combustibili fossili per la generazione di calore. Ne consegue da ciò che i benefici attesi per le aziende di settore sono riconducibili alla possibilità di immettere sul mercato una tecnologia di accumulo termico efficiente e versatile per la valorizzazione sia del calore proveniente da fonte solare sia del calore di scarto proveniente da processi industriali.

Tematica "materiali e dispositivi per il monitoraggio degli impianti CSP/CST e l'innovazione dei processi O&M":

- Con riferimento alla linea di ricerca sui "sensori di sporco/failure degli specchi per la digitalizzazione del campo solare degli impianti CSP/CST", si prevedono ricadute applicative e/o possibile industrializzazione dei risultati del Progetto, sia nello specifico del componente sensore per specchio solare di impianti CSP/CST che nella trasferibilità dei rivestimenti sensori sviluppati ad altri componenti di impianti solari. Grande interesse suscita la potenziale "smartizzazione" del campo solare equipaggiato di sensoristica opportunamente sviluppata per i componenti riflettori. La possibilità di integrare funzionalità diagnostiche in rivestimenti autopulenti, attuando un sistema di sensing distribuito, consente infatti di rispondere con un'unica soluzione a due delle problematiche più significative della manutenzione del campo di specchi solari: il lavaggio con ridotti quantitativi di acqua e la manutenzione quando effettivamente necessaria. Le aziende del settore CSP/CST sono orientate alla digitalizzazione dell'intera filiera, al fine di implementare il programma di Industria 4.0 e questo richiede un primo step di dotazione "hardware" della componentistica presente negli impianti. Per quanto attiene più specificamente agli specchi solari, smartizzare uno specchio solare significa renderlo interrogabile e quindi è evidente che applicare rivestimenti dotati di proprietà elettriche e/o optoelettroniche compatibili con la funzione primaria di elevata riflettanza solare rappresenti il viatico di un processo di digitalizzazione, con ricadute possibili anche in altri settori. In quest'ambito si evidenzia che, per ridurre i costi capitali del campo solare, negli impianti fotovoltaici ad inseguimento è già stato proposto il controllo wireless dei tracker solari e che tale approccio non è mai stato adottato negli impianti CSP/CST (in particolare a collettori lineari LFC/PTC) commerciali. L'applicazione della comunicazione wireless a campi solari CSP/CST opportunamente sensorizzati eliminerebbe sostanzialmente i costi di investimento e operativi legati al cablaggio dei collettori al quadro di controllo principale; tale cablaggio, infatti, è normalmente interrato e comporta costi di realizzazione e di manutenzione elevati. Inoltre, evitare il cablaggio interrato può avere un effetto positivo sull'impatto ambientale degli impianti CSP/CST. Una tra le ambizioni del Progetto è, pertanto, quella di contribuire, in una prospettiva di medio-lungo termine, alla completa eliminazione dei costi di investimento e operativi legati al cablaggio dei collettori al quadro di controllo principale, attraverso l'implementazione di un sistema di controllo wireless per collettori LFC/PTC, con particolare riferimento a quelli Fresnel, con superficie riflettente opportunamente sensorizzata. La possibilità di fabbricare, attraverso tecniche scalabili, sensori piezoelettrici di sporco è di sicuro interesse in molteplici altri settori diversi dal CSP/CST (impianti PV, monitoraggio ambientale delle polveri sottili disperse nell'atmosfera, controllo di livello di polveri, granulati e fluidi in contesti industriali,

ecc.). Per quanto concerne lo sviluppo di vernici ottiche fotoluminescenti e/o materiali piezofotonici in grado di determinare una “codifica” del corretto funzionamento del componente ottico fruibile attraverso un sistema di imaging, si ipotizzano importanti ricadute in diversi settori, tra cui quello del monitoraggio distribuito della pressione sperimentata da aeromobili o loro parti e, più in generale, del monitoraggio non distruttivo dello stress di componenti meccanici (diagnosi della salute strutturale).

- Per la linea di ricerca sulla “diagnosi a ultrasuoni per la rilevazione di occlusioni solide nel piping di impianti CSP/CST utilizzando miscele di sali fusi come fluido termovettore”, l’attività di sviluppo e sperimentazione di soluzioni tecniche per la diagnosi in remoto dell’incipiente o avvenuta formazione di occlusioni solide nel piping degli impianti CSP/CST potrebbe fornire dati importanti per le industrie del settore, facilitando la commercializzazione di una strumentazione innovativa che potrebbe migliorare sostanzialmente la gestione delle fasi operative degli impianti CSP/CST a sali fusi, riducendo i costi di manutenzione e consentendo agli operatori di intervenire prontamente nel caso di fermi impianto, con rilevanti benefici per le società specializzate nella manutenzione e nella gestione degli impianti solari a concentrazione. Con la capacità di monitorare e diagnosticare in tempo reale le condizioni interne dei sistemi di piping, gli operatori avrebbero infatti la possibilità di intervenire prontamente per mitigare eventuali interruzioni dovuti all’incipiente formazione o alla formazioni di occlusioni di sali solidificati, riducendo i fermi impianto con benefici effetti in termini di migliore continuità di servizio e aumento della producibilità degli impianti, riduzione dei costi O&M, riduzione del costo dell’energia prodotta e, infine, maggiore stabilità e rendimento degli investimenti di un impianto CSP/CST.

Tematica “integrazione degli impianti CSP/CST in sistemi di poligenerazione distribuita asserviti a utenze industriali e civili”:

- Con riferimento alla linea di ricerca sui “sistemi di cogenerazione distribuita, alimentati da impianti CSP/CST ibridizzati con PV, asserviti a utenze industriali e civili locali”, si evidenzia che il solare a concentrazione, termodinamico e termico, è una tecnologia che permette di produrre energia, elettrica o termica, utilizzando la radiazione solare concentrata. La cogenerazione distribuita, invece, è un sistema di produzione di energia in cui un’unica fonte primaria produce contemporaneamente elettricità e calore, che vengono poi distribuiti in modo decentralizzato. Il CSP/CST può essere applicato alla cogenerazione distribuita, fornendo il calore solare per alimentare un sistema di cogenerazione di piccola scala. Lo sviluppo di sistemi cogenerativi distribuiti alimentati da solare a concentrazione consentirebbe una maggiore diffusione della tecnologia del CSP/CST anche in aree con una DNI tra 1250 e 1800 kWh/m<sup>2</sup>/anno, quindi nella maggior parte (circa 93%) del territorio italiano. In merito all’impiego dei sistemi solari termici a concentrazione per la produzione di calore da utilizzare nei processi industriali, tenendo conto che la domanda di calore per tali applicazioni costituisce, nei Paesi europei, circa il 7% dei consumi energetici finali complessivi (fonte: Progetto europeo POSHIP), si comprende come sia possibile, per il CST, l’apertura di un nuovo e vasto settore aggiuntivo di mercato. Tale applicazione avrebbe ricadute positive anche in futuro come supporto alla nascente industria dell’idrogeno i cui costi, è stato valutato da alcuni importati operatori del mercato, potrebbero essere anche fino a 2 volte quelli del gas metano. In merito ai benefici per le aziende di settore ottenibili dai risultati previsti della linea di ricerca, si evidenzia inoltre che, a titolo di esempio, l’innovativo sistema micro-PTC proposto da UniFI, di cui si realizzerà un up-grade nell’ambito del Progetto (finalizzato, tra l’altro, ad estenderne il campo applicativo, migliorandone al contempo le performance e riducendone i costi), si presenta come di sicuro interesse per l’industria manifatturiera di componentistica avanzata per impianti FER e potrà trovare ricadute applicative, anche di breve-medio periodo, in termini di produzione industriale, con evidenti benefici economici-finanziari per i proponenti del Progetto. Inoltre, sempre per quanto attiene al sistema micro-PTC, si intravede una immediata ricaduta in termini di utilizzo in ambiti residenziali (PED, Positive Energy Districts) e industriali, e sono molteplici le manifestazioni di interesse già ricevute sia a livello di utilizzatori che di produttori di componentistica termo-meccanica (settore in cui il nostro Paese si distingue come primo produttore a livello UE ed essendo uno dei principali leader a livello mondiale). Infine, nell’ambito della presente linea di ricerca, le attività di sviluppo di modelli predittivi per impianti CSP/CST promettono importanti ricadute applicative in termini di: (i) creazione di un contesto di riferimento per lo sviluppo di componenti ML per la predizione della produzione delle componenti CSP/CST di sistemi di cogenerazione; (ii) ottenimento di dati oggettivi sugli impatti della capacità di rilevazione degli scostamenti di produzione sulla manutenzione predittiva di tali componenti; (iii) ulteriore sviluppo delle capacità di controllo ottimale del sistema grazie alla capacità predittiva ottenuta. Il combinato disposto delle ricadute dei risultati ottenuti dalle attività di sviluppo di modelli predittivi per impianti CSP/CST permetterebbe alle aziende di settore di sviluppare e immettere sul mercato impianti di cogenerazione digitalizzati con caratteristiche innovative in grado di: (a) massimizzare la produzione di energia riducendo le perdite di scostamento con alert precoci che diano luogo ad azioni manutentive mirate e tempestive; (b) ottimizzare le risorse produttive e di storage mediante predizione a breve e medio periodo della capacità produttiva riducendo ulteriormente i mismatch tra produzione e richiesta dell’intero sistema; (c) supportare la fornitura di servizi ancillari legati alla capacità predittiva della produzione e della disponibilità.

- Per la linea di ricerca sull’“analisi delle potenzialità degli impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER per la decarbonizzazione dell’industria”, le attività previste consistono nell’ottimizzazione tecnico-economica (es. trovare soluzioni a massimo Net Present Value) di sistemi energetici ibridi CSP/CSP-PV-Eolico-Accumuli capaci di cogenerare energia elettrica e calore per diversi settori industriali. Verranno prese in considerazione diverse tipologie di industrie energivore con fabbisogni differenti in termini di temperatura del calore e profili di consumi termici/elettrici, sempre però con riferimento alle tipologie di industrie presenti sul territorio italiano. Pertanto, le scelte impiantistiche ottimali (scelta e taglie ottimali dei componenti, loro integrazione, gestione operativa ottimale, range di temperature di fornitura del calore, ecc.) ed i relativi indici prestazionali (NPV, Levelized Cost of Heat or Electricity, pay back time, ecc.) forniranno indicazioni utili, rispettivamente, alle aziende che sviluppano e costruiscono i componenti (quali, ad esempio, collettori solari/campo specchi, ciclo ORC/vapore, sistemi di accumulo, pompe di calore ad alta temperatura, riscaldatori elettrici, ecc.) e alle aziende energivore

presenti sul territorio Italiano. Concludendo, i risultati della ricerca permetteranno di evidenziare il vantaggio economico delle tecnologie ibride ed i settori industriali con maggiore potenziale di integrazione, favorendo dunque investimenti sia da parte di utenti industriali (interessati a decarbonizzare i loro processi), sia da parte di società di ingegneria per la realizzazione di impianti ibridi, sia da parte di aziende legate allo sviluppo di componenti richiesti per l'ibridizzazione. I modelli e gli approcci di ottimizzazione sviluppati potranno essere di supporto sia nella fase di design degli impianti da parte di società di ingegneria che nella fase di gestione di impianti ibridi.

- Per la linea di ricerca sullo "studio concettuale dell'utilizzazione di calore solare da impianti a concentrazione per la valorizzazione di matrici organiche residuali mediante processi pirolitici e coproduzione di elettricità", lo studio verrà condotto al fine di elaborare analisi di fattibilità, strategie di accoppiamento per l'utilizzazione del calore solare nella valorizzazione di biomasse e/o matrici polimeriche residuali e schemi dettagliati di processo che potranno essere utilizzati in futuri progetti dimostrativi e impianti pilota, con possibili benefici per le aziende produttrici di collettori solari e impianti CSP/CST.

Come richiesto in fase di valutazione del Progetto, in relazione alla strategia di trasferimento tecnologico e al coinvolgimento industriale, alla luce delle prospettive di sviluppo previste nell'ambito del Progetto, sono di seguito specificati per ogni linea di ricerca del Progetto, inserita nell'ambito della tematica scientifico-applicativa di riferimento, l'impatto atteso sulla filiera italiana del CSP/CST (anche rispetto a competitor esteri) e le prospettive rispetto ad altre tecnologie rinnovabili che già si sono affermate.

Tematica "sistemi di accumulo termico per impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER e per la fornitura di energia su base stagionale":

- Con riferimento alla linea di ricerca sulla "comparazione sperimentale tra sistemi di accumulo termico, di tipo termocline a sali fusi, per l'ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER", l'impatto atteso sulla filiera italiana del CSP/CST dell'ottimizzazione del sistema di accumulo termico ibrido è rappresentato principalmente dal raggiungimento di una maggiore conoscenza e, quindi, da una maggiore penetrazione nel mondo industriale di questo tipo di stoccaggio termico che combina i vantaggi del CSP/CST con quelli derivanti da una tecnologia matura come può essere il PV con l'obiettivo ultimo di configurarsi come soluzione più economica e che non fa uso di materiali critici rispetto all'utilizzo di batterie elettriche convenzionali. Fotovoltaico ed Eolico rappresentano delle tecnologie economicamente convenienti ma le loro prestazioni dipendono strettamente dalle condizioni meteorologiche e la loro penetrazione nelle reti elettriche di trasmissione è frenata dal fenomeno della sovrapproduzione che si verifica nei momenti di massima produzione, ossia nelle ore centrali della giornata, quando appunto la produzione di energia supera il fabbisogno e si traduce in problemi di gestione della rete, con il prezzo dell'energia elettrica prodotta da PV/Eolico che a questo punto diventa negativo. Il problema della sovrapproduzione da PV/Eolico è ormai avvertito in molti Paesi europei; in Germania, recentemente, è stato approvato il cosiddetto "schema Solarspitzen" (picco solare) che sospende la remunerazione dei nuovi impianti fotovoltaici quando i prezzi dell'elettricità sono negativi. I recenti fenomeni di black-out avvenuti in Spagna e Francia hanno evidenziato che, in linea generale, oltre a interconnessioni e stoccaggi elettrici insufficienti, la crescita delle tecnologie energetiche rinnovabili non programmabili, come PV ed Eolico, non è stata accompagnata da un potenziamento proporzionale della rete, anche in termini di meccanismi tecnici e di mercato che favoriscano la flessibilità della domanda e l'offerta di servizi ancillari. Secondo l'Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA), "i governi devono soppesare i costi iniziali di un'infrastruttura resiliente rispetto ai benefici della sicurezza di approvvigionamento". Il CSP/CST ibridizzato che, grazie alla presenza dell'accumulo termico, è una tecnologia FER programmabile, può rappresentare una soluzione intelligente per unire i vantaggi di ciascuna tecnologia rinnovabile che partecipa all'ibridizzazione. Il tema dell'ibridizzazione degli impianti CSP/CST è una delle priorità indicate nel "SET Plan" per lo sviluppo della nuova generazione di questi impianti. Secondo questo approccio gli impianti CSP/CST sono visti come "hub energetici" che raccolgono la sovrapproduzione di altri impianti FER contribuendo in maniera fattiva a regolare i flussi energetici nelle reti di trasmissione. Nell'ambito del Progetto 1.9 del precedente PTR 2022-2024 della RdS, è stata realizzata un'analisi sulla valutazione della fattibilità operativa degli impianti ibridizzati tra CSP, PV ed Eolico sui mercati MSD e MGP, valutandone inoltre il potenziale come UVAM, e sono stati sviluppati degli studi sullo sviluppo di scenari nazionali per il periodo 2030-2040, permettendo simulazioni per futuri progetti di impianti ibridi operanti nel mercato MGP. I risultati degli studi condotti hanno dimostrato, inoltre, che gli impianti ibridi CSP-PV-Eolico possono raggiungere elevati livelli di programmabilità e l'inclusione del CSP rende l'impianto particolarmente adatto a coprire la domanda del mercato MSD; la configurazione completamente ibrida dell'impianto (ovvero con tutte e 3 le tecnologie integrate) ha mostrato le migliori prestazioni in termini di programmabilità, riuscendo a coprire interamente la domanda MSD.

- Per la linea di ricerca sui "sistemi di riscaldamento elettrico a microonde dei sali fusi per l'ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER", si evidenzia che la filiera italiana del CSP/CST ha uno dei suoi punti di forza nell'impiego di sali fusi, in particolare dei "Solar Salt" (40% KNO<sub>3</sub> + 60% NaNO<sub>3</sub>), come fluido termovettore e mezzo di accumulo per impianti a concentrazione (progetti commerciali di Partanna e Stromboli). La presente linea di ricerca, proponendo un sistema di riscaldamento innovativo specificamente pensato per i sali fusi, rafforza quindi un settore in cui la filiera italiana già gode di un vantaggio competitivo, rendendolo ancora più centrale e strategico. Inoltre, l'integrazione con altre realtà economiche - come il settore dei dispositivi a microonde - coinvolge segmenti produttivi finora estranei alla filiera del CSP/CST, integrandola e rafforzandola. Nel confronto con altre tecnologie rinnovabili, la presente linea di ricerca si propone di superare una delle barriere più significative alla diffusione delle tecnologie rinnovabili, ovvero le limitazioni di capacità e potenza di carica/scarica di diversi sistemi d'accumulo.

- Per la linea di ricerca sui "sistemi di accumulo termico stagionali, di tipo termo-chimico a zeoliti, alimentabili da CST", le prospettive di sviluppo di tale tecnologia di accumulo termico possono avere interessanti ricadute sulla filiera del CST per applicazioni a media

temperatura, aumentandone la versatilità di utilizzo, anche su base stagionale, rispetto alle tecnologie di accumulo di tipo convenzionale. Inoltre, la tecnologia si presta a interessanti ibridizzazioni con altre tecnologie di accumulo, risultando pertanto sinergica rispetto ad altre tecnologie rinnovabili attualmente meglio affermate.

Tematica “materiali e dispositivi per il monitoraggio degli impianti CSP/CST e l’innovazione dei processi O&M”:

- Con riferimento alla linea di ricerca sui “sensori di sporco/failure degli specchi per la digitalizzazione del campo solare degli impianti CSP/CST”, attualmente non esistono metodi digitali di controllo dello sporco/failure di campi solari e dunque, se il Progetto riuscisse a soddisfare le aspettative, i risultati costituirebbero un unicum anche rispetto ai competitor di mercato. Rispetto alle tecnologie rinnovabili con maggiore livello di maturità (quali il PV) si sottolinea che, sebbene il livello di digitalizzazione della manutenzione per queste tecnologie è in genere piuttosto avanzato, si potrebbe palesare, comunque, uno scenario di transfer dei risultati ad esempio anche a campi solari PV (in considerazione del fatto che lo sporco e la manutenzione sono tematiche trasversali). Resta chiaro che lo sviluppo di sistemi CSP/CST rispetto a tecnologie FER meglio affermate ha il potenziale di stabilizzare le reti grazie alla risorsa “accumulo” e, quindi, più che essere in competizione vuole essere in sinergia.

- Per la linea di ricerca sulla “diagnosi a ultrasuoni per la rilevazione di occlusioni solide nel piping di impianti CSP/CST utilizzando miscele di sali fusi come fluido termovettore”, una volta sviluppata la soluzione tecnica per diagnosticare la formazione di occlusioni solide, ciò comporterà una riduzione dei costi di manutenzione (OPEX), facilitando di conseguenza un abbassamento del costo dell’energia prodotta. Questa diminuzione renderà più vantaggiosa la decarbonizzazione delle reti energetiche italiane attraverso l’uso di impianti CSP/CST e favorirà un’integrazione più efficace con altre fonti di energia rinnovabile. Dal punto di vista tecnico, si prevede un impatto indiretto significativo: un aumento della stabilità operativa degli impianti, risultante dalla riduzione dei tempi di fermo. Questo miglioramento porterà ad un incremento sia del fattore di capacità sia dell’efficienza nella conversione dell’energia solare in elettricità o calore.

Tematica “integrazione degli impianti CSP/CST in sistemi di poligenerazione distribuita asserviti a utenze industriali e civili”:

- Con riferimento alla linea di ricerca sui “sistemi di cogenerazione distribuita, alimentati da impianti CSP/CST ibridizzati con PV, asserviti a utenze industriali e civili locali”, questa mira a sviluppare e validare sistemi innovativi di cogenerazione distribuita, alimentati da impianti CSP/CST ibridizzati con PV, in grado di supportare l’evoluzione del sistema energetico nazionale secondo gli obiettivi della riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub>, della sicurezza dell’approvvigionamento energetico, dell’accettabilità sociale, dell’efficienza energetica, dello sfruttamento delle fonti energetiche rinnovabili al minor costo possibile e del miglioramento delle condizioni ambientali a livello locale in aree residenziali/industrializzate antropizzate fortemente inquinate, costituenti gli asset fondamentali della politica energetica dell’Unione Europea. Altro obiettivo è quello di identificare un know-how energetico-ambientale dei componenti di processo capace di stimolare la nascita, nel sistema industriale italiano, di una filiera innovativa in grado di competere nel breve/medio termine nel mercato internazionale delle energie rinnovabili. Il know-how sviluppato consentirebbe, una volta industrializzato, il rilancio dei comparti tradizionali dell’industria nazionale (specchi, inseguitori, coating, tubi ricevitori) oggi in fase di ridimensionamento, con la creazione di una nuova linea in grado di competere in mercati caratterizzati da una forte domanda di innovazione tecnologica e con enormi potenzialità di espansione. Con specifico riferimento alle attività di sviluppo di modelli predittivi per impianti CSP/CST, la prospettiva è la riduzione del gap di digitalizzazione del CSP/CST rispetto a fonti rinnovabili con processi di digitalizzazione avanzati (per esempio PV).

- Per la linea di ricerca sull’“analisi delle potenzialità degli impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER per la decarbonizzazione dell’industria”, come evidenziato in precedenza, le scelte impiantistiche ottimali forniranno indicazioni utili alle aziende che sviluppano e costruiscono i componenti. Per gli impianti solari a concentrazione, per i relativi accumuli ed eventualmente per altri componenti specifici (ad esempio le pompe di calore ad alta temperatura) sarà inoltre possibile individuare la potenza installata nell’impianto ibrido in funzione del CAPEX dello specifico componente: questo potrà fornire target di costo significativi per gli sviluppatori di specifici componenti.

- Per la linea di ricerca sullo “studio concettuale dell’utilizzazione di calore solare da impianti a concentrazione per la valorizzazione di matrici organiche residuali mediante processi pirolitici e coproduzione di elettricità”, l’esecuzione della ricerca renderà disponibili dati e metodologie per confrontare l’uso del calore solare con l’elettrificazione del processo pirolitico a spese di elettricità rinnovabile permettendo di individuare gli ambiti più ottimali di utilizzo delle diverse opzioni possibili.

Come richiesto in fase di valutazione del Progetto, in relazione alla strategia di trasferimento tecnologico dei risultati/prodotti della ricerca di Progetto e al coinvolgimento industriale, sono di seguito riportate per ogni linea di ricerca del Progetto, inserita nell’ambito della tematica scientifico-applicativa di riferimento, alcune considerazioni in merito alla previsione degli impatti economici delle tecnologie proposte.

Tematica “sistemi di accumulo termico per impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER e per la fornitura di energia su base stagionale”:

- Con riferimento alla linea di ricerca sulla “comparazione sperimentale tra sistemi di accumulo termico, di tipo termocline a sali fusi, per l’ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER”, attraverso l’ottimizzazione del nuovo sistema di stoccaggio termico alimentabile da CSP/CST e da altra tecnologia FER “elettrica”, in primis PV, è possibile abbassare i costi di investimento e aumentare la producibilità dell’impianto ibridizzato in quanto si passa da una configurazione di sistema che utilizza uno scambiatore di calore ed un fluido intermedio per accumulare l’energia elettrica prodotta da PV ad una configurazione con un riscaldatore elettrico immerso direttamente nel mezzo di accumulo. Inoltre, questi sistemi di accumulo termico possono sostituire le batterie elettriche convenzionali andando così ad abbassare ulteriormente i costi iniziali. Si evidenzia che in letteratura [L. Pilotti et al., Applied Energy 331 (2023) 120369, doi:

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120369>], il sistema ibrido CSP + PV con sistema di accumulo termico alimentato sia da energia

termica (CSP) che elettrica (PV) - mediante effetto Joule - risulta essere la soluzione più conveniente nel caso di penetrazione medio-alta delle rinnovabili nella rete elettrica, con un LCOE nell'intorno di 150 €/MWh; le altre soluzioni tecnologiche prese in esame comprendono il PV stand-alone, il PV integrato con batterie elettrochimiche e il CSP + PV + batterie elettrochimiche. Tra i fattori che influenzano il valore di LCOE degli impianti CSP ibridi sono presenti il costo dell'accumulo, l'efficienza di conversione dell'energia elettrica in termica e, successivamente, dell'energia termica in elettrica, e la complessità del sistema. In quest'ambito, con le innovazioni che si intende sviluppare nel corso del triennio di Progetto si punta a: incrementare la capacità termica degli accumuli termoclini ibridi del 10% e semplificarne le procedure di carica riducendo i tempi del 10%, ridurre i costi dell'ibridizzazione del 20% e dimostrare la fattibilità di questi sistemi ancora non presenti sul mercato. Nel complesso ci si aspetta di ridurre LCOE degli impianti CSP ibridi di almeno il 10%.

- La linea di ricerca sui "sistemi di riscaldamento elettrico a microonde dei sali fusi per l'ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER" si caratterizza per un basso TRL (3-4) e si propone di convalidare la tecnologia del riscaldamento elettrico dei sali mediante microonde per mezzo di un prototipo sperimentale di accumulo termico su scala di laboratorio. A ragione del basso livello di maturità della tecnologia proposta, non è possibile stimare il potenziale LCOE/CAPEX/OPEX. Tuttavia, è possibile considerare come baseline la (più matura) tecnologia di riscaldamento elettrico dei sali mediante effetto Joule, le cui prestazioni ci si propone di superare mediante il riscaldamento per mezzo delle microonde. Come detto in precedenza, in letteratura [L. Pilotti et al., Applied Energy 331 (2023) 120369, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120369>], il sistema ibrido CSP + PV con sistema di accumulo termico alimentato sia da energia termica (CSP) che elettrica (PV) - mediante effetto Joule - risulta essere la soluzione più conveniente nel caso di penetrazione medio-alta delle rinnovabili nella rete elettrica (LCOE nell'intorno di 150 €/MWh). Le altre soluzioni tecnologiche prese in esame nella suddetta letteratura comprendono il PV stand-alone, il PV integrato con batterie elettrochimiche e il CSP + PV + batterie elettrochimiche.

- Per la linea di ricerca sui "sistemi di accumulo termico stagionali, di tipo termo-chimico a zeoliti, alimentabili da CST", la tecnologia in oggetto non è ad uno stadio di maturità tale da poter quantificare gli impatti economici futuri. Pertanto, al momento non è possibile definire modelli comparativi tali da poter valutare il loro potenziale in termini di analisi basate su LCOE/CAPEX/OPEX.

Tematica "materiali e dispositivi per il monitoraggio degli impianti CSP/CST e l'innovazione dei processi O&M":

- Con riferimento alla linea di ricerca sui "sensori di sporcamento/failure degli specchi per la digitalizzazione del campo solare degli impianti CSP/CST", non esistono modelli economici comparativi applicabili a tecnologie che ancora non sono sviluppate, quali quelle oggetto della linea di ricerca in esame, e non sarebbe corretto pertanto quantificare uno scenario di impatto economico. Resta comunque evidente che l'obiettivo è ridurre l'OPEX senza incrementare il CAPEX, come atteso dall'implementazione dei sistemi autodiagnostici che si intende studiare nell'ambito del Progetto.

- Per la linea di ricerca sulla "diagnosi a ultrasuoni per la rilevazione di occlusioni solide nel piping di impianti CSP/CST utilizzando miscele di sali fusi come fluido termovettore", la tecnologia proposta è ancora in una fase di sviluppo poiché è un "concetto tecnologico formulato" con un TRL di 2. Attualmente sono state identificate le applicazioni della tecnologia e sono stati condotti gli studi per la fattibilità del concetto, che permetteranno nel triennio di Progetto la loro implementazione, ma non si è ancora proceduto con alcuna sperimentazione. Poiché è stato previsto nel Progetto di far progredire la tecnologia a livello di "validazione di concetto" - TRL 3 - con delle analisi mirate principalmente alla realizzazione del dispositivo prototipale di rilevazione a ultrasuoni e alle sperimentazioni in laboratorio - TRL 4 - non sono state né condotte né previste in questa fase valutazioni di tipo tecnico-economico. Tuttavia, poiché l'impatto previsto è sulla possibilità di incrementare la stabilità di produzione dell'impianto CSP/CST dotato del dispositivo di diagnosi a ultrasuoni, con una conseguente diminuzione dei costi di manutenzione ed incremento della produzione di energia, si prevede che la soluzione proposta possa consentire una riduzione, attualmente non quantificata, del LCOE.

Tematica "integrazione degli impianti CSP/CST in sistemi di poligenerazione distribuita asserviti a utenze industriali e civili":

- Con riferimento alla linea di ricerca sui "sistemi di cogenerazione distribuita, alimentati da impianti CSP/CST ibridizzati con PV, asserviti a utenze industriali e civili locali", si evidenzia che nel corso della "Conferenza SolarPACES 2024", svoltasi a Roma, sono stati presentati degli studi i cui risultati preliminari hanno indicato che con l'impiego di un collettore mini-PTC disponibile commercialmente: (i) è possibile produrre calore di processo tra 120 e 250 °C per applicazioni industriali con LCOH, in aree tipo Bergamo, compreso tra 4.30 e 4.83 c€/kWh; (ii) una temperatura di uscita del fluido termovettore dal mini-PTC di 200 °C consente l'LCOH più basso, rappresentando un compromesso tra i costi dell'impianto (in particolare quelli relativi ai sistemi di accumulo termico a doppio serbatoio) e l'energia termica prodotta. Nel corso del triennio precedente della RdS, nell'ambito del Progetto è stata effettuata un'analisi numerica del potenziale applicativo della tecnologia micro-CSP basata sull'innovativo prototipo di sistema micro-PTC, sviluppato dall'Università degli Studi di Firenze (UniFI) in attività di ricerca precedenti a quelle di Progetto, considerando, tra l'altro, 2 casi studio di produzione di calore per applicazioni di processo industriale a media temperatura, in particolare a 160 °C e 350 °C. L'analisi è stata condotta, per vari siti del territorio nazionale a diversa latitudine (Milano lat. 45.46, Firenze lat. 43.77, Roma lat. 41.90, Palermo lat. 38.11) ipotizzando l'impiego del sistema micro-PTC di UniFI e di un sistema di accumulo a sali fusi a singolo serbatoio; il fluido termovettore era olio diatermico. Si è ipotizzato dapprima l'impiego del micro-PTC nella sua attuale configurazione, con le criticità che erano state rilevate nell'ambito della sua caratterizzazione sperimentale condotta nell'ambito del Progetto, ovvero limitata efficienza (dovuta agli elevati valori di emissività termica del coating dei tubi ricevitori attualmente in dotazione) e bassi valori di intercept factor (imputabili, oltre che all'incertezza delle misure ottiche, anche al processo costruttivo del concentratore micro-PTC e della struttura del modulo di parabola dei singoli concentratori). Per l'applicazione industriale con richiesta di calore a 160 °C, l'LCOH risultava superiore a circa 13 c€/kWh per tutti i siti, mentre per quella con richiesta di calore a 350 °C, l'LCOH risultava minimo a Palermo, dove valeva circa 23 c€/kWh, e massimo a Firenze,

pari a circa 32 c€/kWh. I casi studio analizzati sono stati, quindi, riconsiderati per valutare i miglioramenti ottenibili dall'impiego di una versione up-grade del micro-PTC di UniFI ottenuta tramite il solo miglioramento del coating del tubo ricevitore; le prestazioni termiche del coating considerato non erano quelle del coating ENEA di ultima generazione sviluppato nel precedente triennio di Progetto, costituente il nuovo stato dell'arte per l'applicazione, bensì quelle del coating del tubo ricevitore commerciale Schott PTR 70 in versione anno 2008. Per l'applicazione industriale con richiesta di calore a 160 °C, l'LCOH risultava pari a circa 9 c€/kWh per tutti i siti, mentre per quella con richiesta di calore a 350 °C, l'LCOH risultava minimo a Palermo, dove valeva circa 10.7 c€/kWh, e massimo a Firenze, pari a circa 12 c€/kWh. La riduzione del LCOH risultava davvero rilevante, in particolare, come normale che fosse, a più alta temperatura. Dal confronto tra gli LCOH del collettore mini-PTC commerciale oggetto dello studio presentato alla "Conferenza SolarPACES 2024" e del prototipo di sistema micro-PTC di UniFI, si rileva che l'LCOH di quest'ultimo è sensibilmente maggiore; chiaramente, un efficace confronto alla temperatura di 350 °C tra i 2 sistemi non è possibile in quanto il mini-PTC commerciale ha una temperatura massima di esercizio di 250 °C mentre il micro-PTC di UniFI è stato testato fino a 300 °C, può operare fino a 350 °C e, ottimisticamente, anche fino a 400 °C. I 2 principali motivi del più elevato LCOH del micro-PTC di UniFI sono di seguito riportati. (1) Il sistema, che è un prototipo, non è ingegnerizzato, presentando tutta una serie di miglioramenti possibili in grado di incrementarne la producibilità, diminuirne i costi operativi e semplificarne e automatizzarne i processi produttivi/di realizzazione (allo stato attuale in parte manuali e, comunque, non ottimizzati trattandosi di un prototipo) e, quindi, diminuirne l'LCOH; tali miglioramenti (inerenti al tubo ricevitore e in particolare al coating solare, al sistema di tracking, al riflettore parabolico e alla riorganizzazione del collettore a livello di telaio, processo costruttivo e assemblaggio) sono stati oggetto di un primo studio nel triennio precedente di Progetto e saranno ulteriormente sviluppati e implementati nel corso del presente triennio 2025-2027 di Progetto. (2) Trattandosi di un prototipo, come già accennato, il micro-PTC è allo stato attuale realizzato con processi produttivi in larga parte manuali e, comunque, non ottimizzati; pertanto, i costi di investimento di un impianto CST basato sul sistema micro-PTC di UniFI sono chiaramente elevati e ciò impatta negativamente sul LCOH. In merito alle problematiche in esame inerenti al LCOH del sistema micro-PTC di UniFI, si evidenzia che nel triennio 2025-2027 di Progetto si intende addivenire a un suo up-grade per applicazioni di cogenerazione distribuita di elettricità (con cicli ORC) e calore di processo (a media temperatura). L'obiettivo è non solo migliorare le prestazioni del micro-PTC di UniFI ma anche ridurne i costi di realizzazione e, pertanto, l'up-grade del sistema sarà sviluppato tenendo conto anche degli aspetti di manufacturing. In particolare, sulla base dei risultati del triennio precedente, nell'ottica di una riconsiderazione di dettagli del sistema micro-PTC di UniFI, si prevede di studiare: (i) l'ottimizzazione della struttura e dei sostegni per minimizzare l'area occupata a parità di area utile/captante; (ii) un layout che consenta la sostituzione dei tubi ricevitori da entrambe le estremità (evitando di dover passare necessariamente dal lato con mandata/ritorno isolati); (iii) una metodologia di costruzione del tubo ricevitore, dotato di coating solare ENEA di ultimissima generazione e ottimizzato per operare in vuoto fino a 350 °C (e, possibilmente, fino a 400 °C), con vita utile di almeno 25 anni; (iv) il miglioramento del sistema di tracking; (v) nuove tecniche di produzione delle parabole, dato che l'attuale procedimento costruttivo prevede diversi passaggi manuali con ripercussioni sulla ripetibilità delle performance. Gli interventi migliorativi individuati saranno implementati, possibilmente a partire da quelli più impattanti e compatibilmente con le risorse disponibili, per realizzare un modulo prototipale del sistema micro-PTC di UniFI in "versione up-grade" che si valuta sarà in grado di ottenere una sensibile riduzione del LCOH che, in caso di produzione industriale massiva del micro-PTC, si ritiene potrà essere ridotto a valori comparabili con quelli dei sistemi commerciali attualmente disponibili quali, ad esempio, il collettore mini-CSP oggetto dello studio presentato alla "Conferenza SolarPACES 2024". A tal proposito, si ritiene di evidenziare che rispetto a quest'ultimo, il sistema micro-PTC di UniFI presenta già innegabili vantaggi in termini di: ridotto ingombro, con possibilità di una migliore integrazione in edifici industriali e civili di contesti fortemente antropizzati; una temperatura massima operativa molto superiore, con possibilità di fornire calore di processo in un più ampio range di temperature e, quindi, per una più ampia gamma di settori industriali; possibilità di essere efficacemente integrato con sistemi ORC operanti anche fino a 350 °C, per la generazione elettricità oltre che di calore, rendendolo ideale per applicazioni di cogenerazione distribuita anche in contesti fortemente antropizzati. Infine, con riferimento alla riduzione prospettica del costo capitale del micro-PTC di UniFI (con conseguente riduzione del LCOH) in caso di sua produzione industriale massiva, si rileva che tra i risultati attesi del Progetto è prevista l'identificazione di una possibile filiera tutta nazionale per la realizzazione del sistema micro-PTC. Si conclude evidenziando che in merito alle attività di sviluppo di modelli predittivi per impianti CSP/CST, previste nella linea di ricerca in oggetto, queste si propongono di creare le basi (i) per la riduzione dei costi operativi, mediante la riduzione degli impatti dei fault, e dei costi di manutenzione e (ii) per la massimizzazione dei ritorni mediante capacità di predizione di produzione e disponibilità.

- Per la linea di ricerca sull'"analisi delle potenzialità degli impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER per la decarbonizzazione dell'industria", l'analisi che verrà svolta sull'ottimizzazione di impianti ibridi, non sviluppando una singola tecnologia, ma valutando l'impatto dell'utilizzo congiunto (ibridizzazione) del CSP/CST con altre tecnologie, non ha target predefiniti di LCOE/LCOH. Tuttavia, i risultati ottenuti su impianti ibridi per la produzione di elettricità nel precedente triennio 2022-2024 hanno dimostrato la necessità di guardare in maniera congiunta all'LCOE e al livello di dispacciabilità ottenibile dall'impianto. Alcune analisi svolte con un approccio simile a quello proposto per il triennio di Progetto 2025-2027 suggeriscono che la copertura del 90% della domanda termica effettuata con impianti ibridi possa garantire una riduzione del 60% del costo del calore generato (LCOH) rispetto all'impianto CST stand alone [M. Colombi, P. Colbitaldo, M.C. Romano, M. Binotti, "Hybrid Concentrated Solar Thermal and Wind Resistive Heating Systems as Key for Competitive Low Emission Industrial Process Heat Generation", proceedings of SolarPACES2024 (under review)].

- Nella linea di ricerca sullo "studio concettuale dell'utilizzazione di calore solare da impianti a concentrazione per la valorizzazione di

matrici organiche residuali mediante processi pirolitici e coproduzione di elettricità” è prevista una analisi tecnico-economica che permetta di stimare il minimum fuel selling price dei tagli liquidi prodotti dalla pirolisi solare.

## 2.8 Verifica dell'esito del progetto

### a) Oggetti e documentazione dei risultati finali

Il raggiungimento degli obiettivi, intermedi e finali, del Progetto 1.9 “Solare Termodinamico” sarà dimostrato mediante l'emissione di idonea documentazione sui risultati conseguiti e la realizzazione di prodotti/deliverable; in particolare, complessivamente saranno elaborati n° 21 report (n° 1 report per ogni LA), con la descrizione dei risultati ottenuti al termine di ogni linea di attività (LA), e si prevede di rendere disponibili n° 1 dimostratore tecnologico, n° 7 prototipi, n° 1 dispositivo e n° 1 software descritti nel seguito della presente sezione del capitolato di Progetto.

Gli elementi per la verifica dell'esito del Progetto sono rappresentati dai risultati e dai prodotti/deliverable delle diverse attività di ricerca previste nell'ambito del triennio 2025-2027. Il primo aspetto riguarda la valutazione obiettiva dei risultati ottenuti in termini di azioni realizzate, destinatari raggiunti, risorse coinvolte e modalità di gestione rispetto a quanto preventivato in fase di ammissibilità del Progetto. Il secondo riguarda, invece, l'analisi dell'efficacia in termini di corrispondenza tra i risultati ottenuti e i prodotti/deliverable sviluppati a fine Progetto e quelli attesi all'inizio ovvero previsti nel capitolato tecnico del Progetto.

La valutazione dei risultati finali del Progetto potrà essere effettuata, nel dettaglio, attraverso la valutazione dei report tecnici, nei quali sarà riportata in modo esaustivo e completo la descrizione dei risultati ottenuti e dei prodotti/deliverable “tangibili” sviluppati (es. nuovi prototipi); in particolare, per questi ultimi, sarà possibile effettuare verifiche prestazionali e/o funzionali presso i luoghi (centri di ricerca, laboratori, ecc.) dove gli stessi sono installati, operativi e disponibili per test ed eventuali ulteriori validazioni sperimentali.

Di seguito si riportano il numero di report tecnici e i prodotti/deliverable specifici per ogni linea di ricerca del Progetto, inserita nell'ambito della tematica scientifico-applicativa di riferimento, e i possibili test di verifica dei risultati.

Tematica scientifico-applicativa su “sistemi di accumulo termico per impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER e per la fornitura di energia su base stagionale”:

- “Comparazione sperimentale tra sistemi di accumulo termico, di tipo termoclino a sali fusi, per l'ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER” (LA1.1, LA1.2, LA1.3) - Saranno emessi n° 3 report tecnici e sarà realizzato n° 1 prototipo di sistema di accumulo termico, di tipo termoclino a sali fusi, alimentabile da CSP/CST e da altre tecnologie FER, dotato di 2 scambiatori di calore a olio (1 di carica alimentato da un campo solare a concentrazione e 1 di scarica) e di resistenze elettriche (di carica, alimentabili da PV) immerse nei sali fusi. Il prototipo sarà ottenuto dall'up-grade del sistema di accumulo termoclino ibridizzato realizzato nel precedente triennio mediante la sostituzione di un componente interno, nella fattispecie uno scambiatore a olio (di carica) collegato a una caldaia elettrica alimentabile da PV, con le resistenze elettriche. La verifica dei risultati potrà essere effettuata attraverso l'analisi dei report tecnici elaborati, attraverso i risultati delle prove sperimentali condotte sul prototipo realizzato e mediante ispezione in loco del nuovo sistema di accumulo termoclino ibridizzato.
  - “Sistemi di riscaldamento elettrico a microonde dei sali fusi per l'ibridizzazione del CSP/CST con altre tecnologie FER” (LA1.4, LA1.5, LA1.6) - Saranno emessi n° 3 report tecnici e sarà realizzato n° 1 prototipo sperimentale per l'applicazione dell'innovativa tecnologia di riscaldamento elettrico dei sali fusi a microonde (di tipo volumetrico), selezionata nel precedente triennio, al fine di verificare le prestazioni della tecnologia nelle condizioni operative ottimali precedentemente individuate. Il prototipo sarà ottenuto dall'up-grade del dispositivo sperimentale sviluppato nel precedente triennio mediante l'implementazione di un opportuno sistema sensoristico, non interferito dalle microonde, e l'acquisizione ed integrazione di un nuovo generatore di microonde con regolazione di frequenza. La verifica dei risultati potrà essere effettuata nel dettaglio attraverso la valutazione dei report tecnici elaborati, nei quali saranno riportate in modo esaustivo e completo le analisi teoriche svolte e i risultati ottenuti dall'esercizio del prototipo sperimentale appositamente realizzato.
  - “Sistemi di accumulo termico stagionali, di tipo termo-chimico a zeoliti, alimentabili da CST” (LA1.7, LA1.8) - Saranno emessi n° 2 report e sarà reso disponibile n° 1 prototipo di sistema di accumulo termo-chimico a zeoliti, costituito da 2 reattori indipendenti (uno per acqua pressurizzata e l'altro per olio diatermico) aventi una taglia compresa tra 125 e 250 litri e contenenti una massa di zeoliti compresa tra 100 e 200 kg. Potranno essere effettuate valutazioni sul prototipo, mediante test strumentali, per l'analisi e verifica dei parametri prestazionali ottenuti durante la sperimentazione in campo rispetto a quelli attesi nella fase di progettazione e analisi modellistica.
- Tematica scientifico-applicativa su “materiali e dispositivi per il monitoraggio degli impianti CSP/CST e l'innovazione dei processi O&M”:
- “Sensori di sporco/failure degli specchi per la digitalizzazione del campo solare degli impianti CSP/CST” (LA1.9, LA1.10) - Saranno emessi n° 2 report tecnici e realizzati n° 2 prototipi di sensori, di cui: (i) n° 1 prototipo di area sensorizzata piezoelettrica di dimensioni (fino a 100x300 mm) compatibili con la funzione diagnostica dello sporco/failure di specchi solari in impianti sperimentali; (ii) n° 1 prototipo “proof of concept” di sensore ottico idoneo alla rilevazione dello sporco/failure degli specchi solari, di dimensioni fino a 50x50 mm, costituito da una matrice trasparente compatibile con le proprietà di uno specchio solare, contenente specie luminescenti in concentrazione e con geometria tali da definire pattern individuabili attraverso tecniche di imaging. La valutazione dei risultati potrà essere effettuata attraverso il posizionamento e test dei suddetti prototipi in ambienti fisicamente significativi, quali il campo solare dell'impianto sperimentale Fresnel “ENEA-SHIP” del C.R. ENEA di Casaccia. In particolare, per quanto riguarda il primo prototipo (superficie sensorizzata piezoelettrica), elemento di verifica specifico sarà l'efficacia dello scaling-up dell'area sensorizzata

piezoelettrica (da 50x50 mm fino a 100x300 cm), mentre, per quanto riguarda il secondo prototipo ("proof of concept" di sensore ottico), elementi di verifica saranno, in primis, la fattibilità del suddetto sensore a partire da nuovi materiali con proprietà di fotoluminescenza (e/o effetto piezofotonico) compatibili col processing di rivestimenti autopulenti e, in secundis, la possibilità di adoperare tecniche di imaging per estrarre "informazioni" dal suddetto dispositivo. La valutazione dei report tecnici costituirà essa stessa elemento di verifica dell'attività di ricerca prodromica all'effettiva produzione dei dispositivi prototipali.

- "Diagnosi a ultrasuoni per la rilevazione di occlusioni solide nel piping di impianti CSP/CST utilizzando miscele di sali fusi come fluido termovettore" (LA1.11, LA1.12) - Saranno emessi n° 2 report tecnici e realizzato n° 1 dispositivo prototipale di diagnosi a ultrasuoni per la rilevazione di occlusioni di sali solidificati nel piping di impianti CSP/CST a sali fusi. I risultati ottenuti al termine delle 2 LA che compongono la linea di ricerca saranno raccolti nei n° 2 report tecnici che includeranno, tra l'altro: l'elenco di tutti i componenti utilizzati per la realizzazione del dispositivo prototipale di diagnosi a ultrasuoni, insieme alle relative specifiche tecniche, i criteri di selezione di detti componenti e le modalità di integrazione tra essi; i risultati dei test di funzionamento/utilizzo del dispositivo condotti sul circuito sperimentale "MoSE" del C.R. ENEA di Casaccia; gli aspetti chiave per la taratura del dispositivo di diagnosi (messi in evidenza sia tramite l'analisi dei risultati delle misurazioni effettuate direttamente sul circuito "MoSE", che attraverso le simulazioni numeriche eseguite) al fine di renderlo utilizzabile su un impianto di scala commerciale in diverse possibili configurazioni operative; le linee guida per il corretto utilizzo del dispositivo di diagnosi a ultrasuoni su impianti CSP/CST a sali fusi, anche di scala commerciale. La verifica dei risultati ottenuti nell'ambito della linea di ricerca potrà essere effettuata mediante una valutazione approfondita dei dati sperimentali e delle simulazioni numeriche raccolti nei report tecnici.

Tematica sull'"integrazione degli impianti CSP/CST in sistemi di poligenerazione distribuita asserviti a utenze industriali e civili":

- "Sistemi di cogenerazione distribuita, alimentati da impianti CSP/CST ibridizzati con PV, asserviti a utenze industriali e civili locali" (LA1.13, LA1.14, LA1.15, LA1.16, LA1.17) - Saranno emessi n° 5 report tecnici. Saranno, inoltre, realizzati: (i) n° 24 esemplari di prototipo di tubo assorbitore per i ricevitori evacuati del sistema micro-PTC proposto da UniFI, ognuno costituito da un coating solare (per impegno in vuoto e temperatura operativa massima di almeno 350 °C e possibilmente di 400 °C, con elevate prestazioni fototermiche e vita utile  $\geq$  25 anni) depositato su tubo substrato di acciaio (di diametro esterno 10 mm, spessore di parete 1 mm e lunghezza dell'ordine dei 500 mm); (ii) n° 1 modulo prototipale ("versione up-grade") del sistema micro-PTC proposto da UniFI dotato, tra l'altro, di nuovi ricevitori ad alta efficienza; (iii) n° 1 dimostratore tecnologico (di tipo prototipale) di sistema di cogenerazione distribuita di elettricità e calore, alimentato da impianti CSP/CST e PV, asservito a utenze locali. Il dimostratore sarà composto dal preesistente impianto sperimentale Fresnel "ENEA-SHIP", dal sistema di accumulo termico ibridizzato, da un impianto PV e un sistema ORC che alimenterà l'illuminazione della "zona impianto"; (iv) script (software) per l'implementazione, test e validazione di algoritmi (architetture AI/ML), con funzionalità previsionale della producibilità, per impianti CSP/CST (funzioni Matlab e/o Python). La verifica dei risultati della linea di ricerca potrà essere effettuata attraverso l'analisi dei report tecnici elaborati, attraverso i risultati delle prove sperimentali condotte sul dimostratore realizzato e mediante ispezione in loco. Inoltre, con specifico riferimento agli script, questi potranno essere sottoposti a verifica tramite esecuzione e confronto prestazionale.

- "Analisi delle potenzialità degli impianti CSP/CST ibridizzati con altre tecnologie FER per la decarbonizzazione dell'industria" (LA1.18): sarà emesso n° 1 report tecnico che descriverà, tra l'altro, i modelli matematici/numerici, la metodologia innovativa per l'ottimizzazione di impianti CSP/CST ibridizzati e i risultati delle ottimizzazioni. Pertanto, la verifica dei risultati potrà essere effettuata nel dettaglio attraverso la valutazione del report tecnico elaborato, anche in riferimento alla sua completezza e coerenza rispetto agli obiettivi riportati nella descrizione della linea di attività LA1.18.

- "Studio concettuale dell'utilizzazione di calore solare da impianti a concentrazione per la valorizzazione di matrici organiche residuali mediante processi pirolitici e coproduzione di elettricità" (LA1.19): sarà emesso n° 1 report tecnico. La verifica dei risultati potrà essere effettuata attraverso la valutazione del report tecnico elaborato il cui contenuto dovrà essere coerente rispetto a quanto previsto nella descrizione (attività e risultati) della LA1.19.

Infine, con riferimento alle linee di attività sulla "Gestione del Progetto - Comunicazione e disseminazione dei risultati" (LA1.20 e LA1.21) saranno emessi ulteriori n° 2 report, uno per ogni LA, e sarà aggiornata la sezione dedicata alla Ricerca di Sistema elettrico del sito web dell'affidatario ENEA in modo da diffondere a un ampio pubblico i principali risultati ottenuti nell'ambito del Progetto. Complessivamente nel corso del triennio di Progetto, si prevede la partecipazione ad almeno 6 tra workshop, congressi e conferenze (nazionali e internazionali) per la disseminazione dei risultati di Progetto. A titolo di esempio, i risultati conseguiti nel Progetto saranno presentati nell'ambito della "SolarPACES Conference", che è l'evento mondiale di riferimento sul CSP/CST organizzato annualmente dal "TCP IEA SolarPACES". Nel corso del triennio di Progetto, verrà, inoltre, organizzato almeno un evento di disseminazione a cui saranno invitati anche gli stakeholder nazionali e rappresentanti dei Ministeri competenti, per presentare i risultati tecnico-scientifici ottenuti e i prodotti sviluppati nell'ambito del Progetto e fornire un supporto tecnico-scientifico all'industria nazionale del CSP/CST e un supporto programmatico rivolto ai decision-maker politici. Infine, complessivamente nel corso del triennio di Progetto, si prevede di sottomettere un numero minimo di 8 articoli per la pubblicazione su riviste scientifiche nazionali/internazionali indicizzate e atti di congresso/conferenza.