

# PIANO TRIENNALE DI REALIZZAZIONE 2022-2024 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]
- Università degli Studi di Roma Tor Vergata [UniRM2]

**Durata del progetto: 36 mesi**

**Costo proposto: 2.300.000,00 €**

## 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 pone come obiettivi:

- i. ridurre il costo di generazione dell'energia, elettrica e termica, degli impianti solari termodinamici (o CSP, Concentrated Solar Power) tal quali ovvero ibridizzati con altre tecnologie da fonti energetiche rinnovabili (FER), sviluppando e sperimentando e/o applicando, in prototipi dimostrativi, materiali, componenti, sistemi, soluzioni tecniche e metodologie avanzate in grado di incrementare le prestazioni, e quindi la producibilità, degli impianti CSP e ridurre le spese operative e di manutenzione (O&M);
- ii. rendere disponibili innovativi sistemi, soluzioni tecniche e metodologiche per l'efficace ibridizzazione del CSP con altre tecnologie FER "elettriche", con particolare riferimento a PV e/o eolico;
- iii. sviluppare e sperimentare componenti e sistemi innovativi per la produzione e fornitura di calore a media e alta temperatura per applicazioni SHIP (Solar Heat Industrial Processes), ovvero per la generazione/cogenerazione/trigenerazione distribuita di elettricità e/o calore e/o energia frigorifera per utenze industriali e civili;
- iv. sviluppare soluzioni tecniche e procedure studiate ad hoc per impianti CSP 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 per l'accumulo) con la finalità di semplificare la gestione operativa e migliorare la bancabilità di tali impianti.

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 "materiali e componenti avanzati per impianti CSP" prevede 4 linee di ricerca:

- Coating innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti CSP a collettori lineari (LA1.1, LA1.2, LA1.3) - Saranno sviluppati e realizzati in forma di prototipo, mediante processi di sputtering d'interesse industriale, un coating a elevate prestazioni fototermiche per tubi ricevitori di impianti micro-PTC a media temperatura ( $\leq 350$  °C) e un coating a prestazioni fototermiche incrementate rispetto allo stato dell'arte per tubi ricevitori di impianti CSP a collettori lineari (PTC o LFC) ad alta temperatura ( $\leq 550$  °C), risultando entrambi i coating stabili per una vita utile di almeno 25 anni.
- Tecnologia micro-CSP basata su sistemi di tipo micro-PTC per la generazione distribuita di energia in contesti civili e industriali (LA1.4, LA1.5, LA1.6) - Sarà analizzato il potenziale applicativo di tale tecnologia in contesti fortemente antropizzati del territorio italiano. Del prototipo di un innovativo sistema modulare micro-PTC, proposto dal co-beneficiario UniFI, sarà effettuata la caratterizzazione sperimentale ed eseguito uno studio progettuale di up-grade finalizzato a incrementarne la temperatura operativa fino a 350 °C (per impiego cogenerativo) e facilitarne l'integrazione in strutture edilizie e l'industrializzazione.
- Superfici riflettenti autopulenti con sensoristica integrata per impianti CSP (LA1.7, LA1.8, LA1.9) - Al fine di razionalizzare gli interventi di pulizia e ridurre i costi O&M del campo solare, saranno ottimizzati metodi di fabbricazione (economici e scalabili) di rivestimenti autopulenti su specchi solari di dimensioni reali, sarà realizzato e caratterizzato in campo un prototipo di superficie riflettente autopulente e saranno sviluppati sensori di sporco/failure per la diagnosi in remoto dell'operatività del campo solare.
- Sistemi di accumulo termo-chimico a zeoliti per applicazioni distribuite a media temperatura del CSP (LA1.10) - La sperimentazione in campo (mediante facility di test appositamente implementate) di innovativi sistemi di accumulo termo-chimico a zeoliti consentirà di valutare il potenziale di tali sistemi per applicazioni termiche distribuite di piccola taglia a media temperatura ( $< 250$  °C) per la climatizzazione degli ambienti, la fornitura di calore di processo per usi industriali e il recupero di calore di scarto da processi termici convenzionali.

La seconda tematica inerente all'"ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili" prevede 3 linee di ricerca:

- Sistemi di accumulo termico, di tipo termoclino, ibridizzati alimentabili da CSP e da altre tecnologie energetiche rinnovabili, per la produzione di calore per processi industriali (LA1.11, LA1.12, LA1.13, LA 1.14) - Sarà progettato e realizzato un prototipo di sistema di accumulo termoclino a sali fusi ibridizzato, alimentabile da un campo solare CSP e da una caldaia elettrica collegata a un impianto PV. La sperimentazione sull'impianto Fresnel "ENEA-SHIP" con asservito il prototipo del sistema di accumulo ibridizzato, supportata da simulazione numerica, consentirà di valutare le prestazioni termiche del prototipo e definire procedure operative di gestione dell'impianto CSP ibridizzato ottimizzate per la produzione di calore per processi industriali.

- Sistemi innovativi di riscaldamento elettrico dei sali fusi per l'ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili (LA1.15, LA1.16, LA1.17, LA1.18) - Sarà condotta un'analisi su sistemi di riscaldamento di tipo resistivo e/o a induzione o micro-onde, alimentabili da PV, potenzialmente più efficienti rispetto al riscaldamento Joule con resistenze elettriche convenzionali immerse nei sali fusi, e sarà progettato un dispositivo sperimentale, realizzato su scala di laboratorio e impiegato per la caratterizzazione delle prestazioni termiche del concept proposto basato sulla tecnologia di riscaldamento più promettente.

- Simulazione e ottimizzazione di impianti ibridi CSP/PV/Eolici di scala medio-piccola operanti sui mercati MGP e MSD (LA1.19) - Sulla base di modelli sviluppati ad hoc di campi eolici e di power block del CSP (sia per cicli Rankine a vapor d'acqua che a fluido organico), sarà valutata la potenzialità degli impianti ibridi CSP/PV/Eolici di incrementare la dispacciabilità e ridurre il costo dell'energia prodotta rispetto sia alle tecnologie CSP, PV ed eoliche non ibridizzate che a impianti ibridi CSP/PV, considerando scenari a domanda elettrica fissata e diversi scenari di prezzi (attuali e futuri) dell'elettricità sul Mercato del Giorno Prima (MGP) e sul Mercato dei Servizi di Dispacciamento (MSD).

La terza tematica inerente a "soluzioni tecniche e procedure operative per il settore industriale del CSP" prevede 2 linee di ricerca:

- Tecnologie ad ultrasuoni per sistemi di rilevazione di occlusioni solide all'interno del piping di impianti CSP utilizzando miscele di sali fusi come fluido termovettore (LA1.20) - Mediante analisi teoriche e simulazioni numeriche, saranno valutate le criticità connesse all'impiego delle tecnologie ad ultrasuoni per l'applicazione in oggetto e sarà resa disponibile la configurazione preliminare e la valutazione di massima del costo di un dispositivo di diagnosi ad ultrasuoni.

- Procedure operative per impianti CSP con fluido termovettore costituito da miscele di sali fusi bassofondenti e studio della compatibilità dei materiali a contatto con le miscele in condizioni reali di funzionamento (LA1.21, LA1.22, LA1.23, LA1.24) - La campagna sperimentale condotta sul circuito "MoSE" dell'ENEA, opportunamente modificato e caricato con due miscele di sali fusi bassofondenti selezionate per applicazioni a temperatura media (200-400 °C) e alta (400-600 °C), consentirà di mettere a punto le procedure per la gestione operativa, ordinaria e di emergenza, degli impianti CSP a sali fusi di scala industriale e di sottoporre provini di acciai, da impiegarsi in qualità di materiali da costruzione per componenti e/o sottosistemi di impianti CSP, a test di corrosione dinamica in condizioni simili a quelle reali di esercizio.

Infine, per massimizzare l'impatto del Progetto sarà curata la comunicazione e disseminazione dei risultati (LA1.25, LA1.26).

### Abstract del progetto ENG

The "Solar thermodynamic" 1.9 Project has the following objectives:

- i. reduction of the cost of electricity and thermal energy produced by thermodynamic solar power plants (or CSP, Concentrated Solar Power), as such or hybridized with other renewable energy sources (RES) technologies, by developing, testing and/or applying in demonstration prototypes: materials, components, systems, technical solutions and advanced methodologies capable of increasing performance and, consequently, producibility of CSP plants, as well as of reducing operational and maintenance (O&M) costs;
- ii. development of innovative systems, technical and methodological solutions for effective hybridization of CSP with other "electrical" RES technologies, particularly PV and/or wind;
- iii. development and testing of innovative components and systems for medium and high temperature heat production for SHIP (Solar Heat Industrial Processes) applications, as well as for distributed generation/cogeneration/trigeneration of electricity and/or heat and/or cooling for industrial and civil users;
- iv. development of technical solutions and procedures specifically studied for CSP plants based on the "ENEA molten salts technology" (parabolic linear collectors, PTC, or Fresnel collectors, LFC, using mixtures of molten salts as heat transfer fluid and storage) with the aim of simplifying operational management and improving the bankability of these plants.

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

The first theme, related to "advanced materials and components for CSP Plants", is articulated in 4 research lines:

- Innovative coatings for evacuated receiver tubes of linear collectors CSP plants (LA1.1, LA1.2, LA1.3) - The following prototypes will be manufactured through sputtering processes: a coating with high photothermal performances for receiver tubes of micro-PTC plants at medium temperatures ( $\leq 350$  °C), a coating with improved photothermal performances compared to state of the art technique for receiver tubes of linear collectors (PTC and LFC) at high temperatures ( $\leq 550$  °C). Both coatings are expected to be stable for a lifetime of at least 25 years.

- Micro-CSP technology based on micro-PTC systems for distributed power generation in civil and industrial contexts (LA1.4, LA1.5, LA1.6) - The application potential of this technology in Italy will be analysed considering highly anthropized contexts. The prototype of an innovative modular micro-PTC system, proposed by the co-beneficiary UniFI, will be experimentally characterized; its design will be then upgraded to increase its operational temperature up to 350 °C (for cogeneration use), to facilitate its integration into building structures and to support its technological transfer to the industry.

- Self-cleaning reflective surfaces with integrated sensors for CSP systems (LA1.7, LA1.8, LA1.9) - In order to reduce cleaning interventions and O&M costs of the solar field, manufacturing methods (low-cost and scalable) of self-cleaning coatings on full-size solar mirrors will be optimized, a prototype of self-cleaning reflective surface will be created and characterized on-field and fouling/failure sensors will be developed for remote diagnosis of solar field operation.

- Zeolite-based thermo-chemical storage systems for distributed applications at medium temperature of CSP (LA1.10) - The field testing

(through specifically implemented test facilities) of innovative zeolite-based thermo-chemical storage systems will allow to evaluate the potential of these systems for small distributed thermal applications at medium temperature (< 250 °C) for air conditioning of rooms, supply of process heat for industrial uses and recovery of waste heat from conventional processes.

The second theme, concerning the "hybridization of CSP with other renewable energy technologies", includes 3 research lines:

- Hybridized thermochemical storage systems, powered by CSP and other renewable energy technologies, for the production of heat for industrial processes (LA1.11, LA1.12, LA1.13, LA 1.14) - A prototype of a hybrid molten salt thermochemical storage system will be designed and built that can be powered by a CSP solar field and an electric heater connected to a PV plant. The testing of the hybridized storage prototype connected to the Fresnel "ENEA-SHIP" plant, supported by numerical simulation, will allow to evaluate the thermal performances of the prototype and to define operating procedures for the management of the hybridized CSP plant optimized for the production of heat for industrial processes.
- Innovative systems for the electrical heating of molten salts for the hybridization of CSP with other renewable energy technologies (LA1.15, LA1.16, LA1.17, LA1.18) - An analysis will be carried out on resistive and/or induction heating systems or micro-waves, powered by PV, potentially more efficient than conventional Joule heating (i.e. electric resistances immersed in molten salts), and an experimental device, realized on laboratory scale, will be designed for the characterization of the thermal performances of the proposed concept based on the most promising heating technology.
- Simulation and optimization of hybrid CSP/PV/Wind power plants of medium-small scale operating on the DAM and ASM markets (LA1.19) - Based on ad hoc models of wind farms and of CSP power blocks (steam/organic fluid Rankine cycles), the capability of hybrid CSP/PV/Wind plants to increase dispatchability and reduce the cost of energy produced, compared to non-hybridized CSP, PV and wind technologies as well as to hybrid CSP/PV plants will be evaluated, considering scenarios with fixed electricity demand and different electricity prices (current and future) on the Day-Ahead Market (DAM) and on the Ancillary Services Market (ASM).

The third theme, related to "technical solutions and operating procedures for the industrial sector of the CSP", includes 2 research lines:

- Ultrasonic technologies for solid occlusion detection systems in the piping of CSP plants using mixtures of molten salts as heat transfer fluid (LA1.20) - Through theoretical analysis and numerical simulations, the critical issues related to the use of ultrasonic technologies for the envisaged application will be assessed with and the preliminary configuration and the rough evaluation of the cost of an ultrasonic diagnostic device will be performed.
- Operating procedures for CSP systems using mixtures of low-melting molten salts as heat transfer fluid and study of the compatibility of materials in contact with these mixtures in real operating conditions (LA1.21, LA1.22, LA1.23, LA1.24) - The experimental campaign conducted on the ENEA's "MoSE" circuit, suitably adapted for circulating two mixtures of low-melting molten salts selected for medium (200-400 °C) and high (400-600 °C) temperature applications, will allow (i) to develop operational, ordinary and emergency procedures for industrial-scale molten salt CSP plants and (ii) to perform dynamic corrosion tests, under conditions similar to those of real operation, of different candidate materials for components and/or subsystems of CSP plants.

Finally, to maximize the impact of the Project, the communication and dissemination of results will be carefully implemented (LA1.25, LA1.26).

## 2.3 TRL progetto

TRL iniziale: 2

TRL finale: 7

Le linee di ricerca del Progetto 1.9 "Solare termodinamico" che prendono direttamente spunto dai risultati del precedente triennio punteranno, in linea di massima, a un incremento del TRL. Più in generale, considerato che il Progetto è di ampio respiro e prevede attività completamente nuove ovvero basate su soluzioni innovative e/o migliorative rispetto a quelle del precedente triennio, l'intervallo dei TRL di partenza e di arrivo delle diverse linee di ricerca risulta piuttosto ampio, essendo previsto comunque un incremento di TRL, per ogni linea, nell'ambito del Progetto.

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

Tematica "materiali e componenti avanzati per impianti CSP" - Per la linea di ricerca sui coating per tubi ricevitori evacuati, si passerà dalla validazione in laboratorio (TRL 4) delle soluzioni più idonee alla realizzazione di coating per applicazioni a temperatura media (200-350 °C) e alta (550 °C) alla fabbricazione, con processi d'interesse industriale, di prototipi di coating su tubi commerciali di acciaio (TRL 7). Per la linea sulla tecnologia micro-CSP basata su sistemi di tipo micro-PTC, per l'incremento da TRL 4 a TRL 6 si prevede la rivisitazione del progetto base di un collettore micro-PTC per incrementarne l'operatività fino a 350 °C, facilitarne l'integrazione in strutture edilizie e l'industrializzazione. Per la linea sulle superfici riflettenti autopulenti con sensoristica integrata, si passerà dalla messa a punto di formulazioni autopulenti (substrati 5x5 cm) su scala laboratoriale (TRL 4) a una scala dimensionale compatibile con specchi d'impianti CSP reali (TRL 5-6); per i sensori integrabili, si passerà da una ricerca a livello concettuale (TRL 2) alla realizzazione e sperimentazione in laboratorio (TRL 3). Per la linea sui sistemi di accumulo termo-chimico a zeoliti, l'attività partirà da un prototipo di reattore a zeoliti (TRL 3), accoppiato a collettori Fresnel e operante a bassa temperatura, per concludersi con la verifica sperimentale, su una scala significativa,

di un accumulo termo-chimico a zeoliti per applicazioni a media temperatura (fino a 250 °C) (TRL 4).

Tematica “ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili” – Per la linea di ricerca sui sistemi di accumulo termico ibridizzati, sulla base dei risultati del precedente triennio (TRL 5) si realizzerà un prototipo di accumulo termoclimo ibridizzato accoppiato con l’impianto ENEA-SHIP in grado di stabilizzare e ottimizzare la fornitura di calore per processi industriali aumentando la frazione da rinnovabili (TRL 7). Per la linea sui sistemi innovativi di riscaldamento elettrico dei sali fusi, si passerà dalla formulazione della tecnologia (TRL 2) con l’analisi di diverse possibili soluzioni ingegneristiche (sistemi resistivi, a induzione e/o a micro-onde) alla verifica sperimentale, su scala di laboratorio, del meccanismo di riscaldamento ritenuto più promettente (TRL 3).

Tematica “soluzioni tecniche e procedure operative per il settore industriale del CSP” – Per la linea di ricerca sulle tecnologie ad ultrasuoni per sistemi di rilevazione di occlusioni solide nel piping di impianti CSP a sali fusi, le soluzioni proposte a livello concettuale (TRL 2) saranno studiate mediante analisi teorico-numeriche finalizzate a definire la configurazione preliminare di un dispositivo di rilevazione (TRL 3). Per la linea sulle procedure operative per impianti CSP utilizzando miscele di sali fusi bassofondenti, partendo dai risultati ottenuti nel triennio precedente circa la caratterizzazione in laboratorio di differenti miscele bassofondenti (TRL 3), saranno scelte le due miscele più promettenti per applicazioni a media (200-400 °C) e alta (400-600 °C) temperatura; materiali da costruzione, opportunamente selezionati, saranno testati sottoponendoli a prove di corrosione a contatto con le miscele in condizioni reali di funzionamento (TRL 6).

## 2.4 Inquadramento del progetto nello stato dell'arte

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

Il solare termodinamico (o Concentrating Solar Power, CSP) è una tecnologia che negli ultimi 10-15 anni ha conosciuto una notevole diffusione a livello mondiale. Molteplici impianti sono oggi operativi in tutto il mondo, con una potenza installata superiore ai 6,2 GWe (di cui 2,4 GWe in Europa) e ulteriori 1,4 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 accumulo 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 ultimi 10 anni, tra il 2010 e il 2020, si è registrata una sensibile riduzione dei costi del LCOE (Levelized Cost of Electricity) del CSP, da 0,34 USD/kWh a 0,108 USD/kWh (fonte: IRENA-2021, Renewable Power Generation Costs in 2020, International Renewable Energy Agency, ISBN 978-92-9260-348-9), con una rapidità 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.

A livello internazionale la ricerca si sta muovendo su tematiche associate all’incremento della dispacciabilità dei sistemi CSP e alla riduzione dei costi capitali e operativi. In particolare i fronti di ricerca di maggior interesse sono i seguenti: sviluppo di impianti ibridi CSP/PV, sviluppo di sistemi CSP ottimizzati per la co-generazione e fornitura di calore di processo all’industria, sviluppo di efficienti ed economici sistemi di accumulo termico, realizzazione di componenti avanzati per la riduzione del costo del campo solare, impiego di nuovi fluidi termovettori per collettori lineari che possano superare i limiti degli oli diatermici sintetici e applicazione di più efficienti sistemi di generazione e co-generazione.

Con particolare riferimento al posizionamento del nostro Paese, storicamente l’Italia è sempre stata all’avanguardia nello sviluppo di nuove tecnologie per lo sfruttamento dell’energia solare. Con specifico riferimento alla tecnologia del CSP, ENEA, fin dall’inizio degli anni 2000, ha sviluppato la tecnologia dei sali fusi in sistemi a collettori lineari, adoperando i sali fusi sia come fluido termovettore che come materiale di accumulo, ottenendo diversi vantaggi rispetto alla più convenzionale tecnologia che prevede l’impiego di collettori lineari con olio diatermico, soprattutto in termini di riduzione dei costi d’impianto, efficienza, e miglioramento della qualità ambientale. 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 (Partanna) è stato da poco ultimato il primo impianto Fresnel a sali fusi commerciale (circa 4,2 MWe con accumulo di 15 h). Un altro impianto simile è attualmente in costruzione in provincia di Trapani. Sempre nell’ambito degli impianti CSP di piccola taglia, è in fase di costruzione un altro impianto CSP da 1 MWe nella provincia di Enna (Dittaino) con tecnologia a olio diatermico che utilizza collettori solari lineari realizzati da una ditta italiana (Elianto). Si tratta di realtà industriali e competenze tutte italiane, che crescono intorno a una tecnologia nuova per un mercato emergente. I suddetti impianti, da considerarsi come primi nel loro genere, presentano infatti 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, il presente Progetto 1.9 “Solare termodinamico”,

sfruttando le competenze dell'affidatario ENEA e di selezionati gruppi di ricerca delle Università italiane co-beneficiarie, propone sia linee di ricerca che prendono direttamente spunto dai risultati conseguiti nel triennio precedente, che linee completamente nuove ovvero linee basate su soluzioni innovative e migliorative rispetto a quelle sviluppate nel precedente triennio, con l'obiettivo specifico di migliorare le performance, ridurre i costi e mettere a punto metodologie di gestione degli impianti CSP (con particolare ma non esclusivo riferimento agli impianti con tecnologia ENEA a sali fusi) tali da migliorarne la bancabilità e la versatilità.

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

Tematica "materiali e componenti avanzati per impianti CSP" – Con riferimento alla linea di ricerca sui coating innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti CSP a collettori lineari, e più specificamente rispetto alla tecnologia degli impianti micro-CSP con collettori di tipo micro-PTC, il 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, in cui le soluzioni proposte sono da considerare all'avanguardia. Diversa è la situazione della tecnologia degli impianti CSP di grande taglia che ha visto, nell'ultimo decennio, le principali aziende produttrici di tubi ricevitori evacuati europee (Schott, Siemens, Rioglass, Archimede Solar Energy) e cinesi (Himin, Royal Tech CSP, TRX Solar, Huiyin) partecipare allo sviluppo di coating per tubi ricevitori con prestazioni fototermiche e durabilità sempre migliori con lo scopo di efficientare la generazione di energia con impianti a collettori lineari PTC e LFC. Per la linea di ricerca sulla tecnologia micro-CSP basata su sistemi di tipo micro-PTC per la generazione distribuita di energia in contesti civili e industriali, riallacciandosi a quanto detto per la linea di ricerca sui coating innovativi, a causa delle ridotte dimensioni dei micro-PTC non è stato possibile utilizzare quanto era stato sviluppato per i tubi ricevitori con DN 70 (tipici dei grandi PTC); questo ha richiesto di percorrere strade completamente diverse adattando i sistemi di sputtering dei tubi sottovuoto per collettori piani, tecnologia quasi esclusivamente residente in Cina. Per la linea sulle superfici riflettenti autopulenti con sensoristica integrata per impianti CSP, si evidenzia che le più grandi aziende produttrici di specchi solari (Rioglass, Flabeg, Guardian, ecc.) sono attualmente interessate a modificare la bagnabilità degli specchi solari attraverso la funzionalizzazione della superficie (senza inficiare la riflettanza speculare) per consentirne la pulizia con minori consumi di acqua di lavaggio. Non esistono ancora soluzioni commerciali adatte allo scopo e dalla letteratura scientifica si evince come i rivestimenti idrofobici e/o idrofilici testati in campo abbiano performance non soddisfacenti (scarsa resistenza all'abrasione/corrosione, costi elevati, limitata compatibilità con i requisiti ottici di uno specchio solare). Inoltre, Rioglass, Tekniker e CENER manifestano un notevole interesse nella "smartizzazione" del campo solare CSP e dichiarano di lavorare allo sviluppo di sensori ottici integrabili negli strati riflettenti per il monitoraggio dello sporco e la razionalizzazione delle procedure di pulizia. Non esistono studi né prodotti che integrino le funzionalità sensoristiche nel layer autopulente, obiettivo altamente strategico per una reale "smartizzazione" del campo solare. Per la linea sui sistemi di accumulo termo-chimico a zeoliti per applicazioni distribuite a media temperatura del CSP, si evidenzia che il ricorso a sistemi di accumulo innovativi, basati su materiali adsorbenti (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.

Tematica "ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili" – Con riferimento alle linee di ricerca sui sistemi innovativi di riscaldamento elettrico dei sali fusi e sui sistemi di accumulo termocline ibridizzati alimentabili da CSP e da altre tecnologie energetiche rinnovabili, si evidenzia che gli accumuli termici per immagazzinare gli eccessi di elettricità da fonti rinnovabili sono attualmente studiati come alternativa alle batterie, avendo capacità più elevate, costi minori e basandosi su materiali non critici. In particolare, i sistemi di accumulo a sali fusi adottati negli impianti CSP sono stati recentemente proposti come versatili hub energetici, capaci di accettare e accumulare elettricità/calore rinnovabile e di alimentare on-demand sia utenze termiche che elettriche (Progetto Regionale WOW-SUN, recentemente chiuso). In questi sistemi la conversione da energia elettrica a termica si basa sull'effetto Joule con resistenze elettriche di tipo convenzionale immerse nei sali fusi, con meccanismi di scambio termico superficiali che però limitano la massima potenza trasferibile. Per la linea sulla simulazione e ottimizzazione di impianti ibridi CSP/PV/Eolici di scala medio-piccola operanti sui mercati MGP e MSD, si evidenzia come esistano studi di integrazione sia a livello di rete (integrazione solo tramite Energy Management system) che a livello tecnologico (presenza di riscaldatori elettrici o pompe di calore), principalmente indirizzati all'ottimizzazione del design o dell'operation di impianti ibridi, considerando principalmente scenari a carico fissato o scenari a costo dell'elettricità dato.

Tematica "soluzioni tecniche e procedure operative per il settore industriale del CSP" – Con riferimento alla linea di ricerca sulle tecnologie ad ultrasuoni per sistemi di rilevazione di occlusioni solide all'interno del piping di impianti CSP utilizzando miscele di sali fusi come fluido termovettore, non si rilevano nello stato dell'arte soluzioni simili a quelle proposte per il monitoraggio e diagnosi in remoto dell'operatività degli impianti CSP (in particolare, PTC e LFC) a sali fusi. Si ritiene tuttavia che le attività di ricerca e le soluzioni tecnologiche impiegate nell'ambito della diagnostica medica e basate sull'impiego di ultrasuoni possano fornire un valido riferimento per la presente attività. Per la linea di ricerca sulle procedure operative per impianti CSP con fluido termovettore costituito da miscele di sali fusi bassofondenti e studio della compatibilità dei materiali a contatto con le miscele in condizioni reali di funzionamento, si evidenzia come, allo stato attuale, nella gestione degli impianti a sali fusi ancora persistono delle difficoltà nel proceduralizzare le operazioni di alcune fasi particolari del funzionamento, quali ad esempio primo avvio, riempimento, drenaggio e situazioni di emergenza che si possono verificare nella normale marcia di un impianto. Inoltre, non esistono dati sulla compatibilità di differenti tipi di acciai con miscele ternarie e quaternarie.

**b) Attività svolte nel triennio precedente**

Le attività svolte nell'ambito del Progetto 1.9 "Solare termodinamico" del precedente PTR 2019-2021 della RdS erano organizzate in 4 tematiche scientifico-applicative.

Nell'ambito della prima tematica, inerente allo "sviluppo di fluidi termici avanzati per il trasporto e l'accumulo dell'energia termica negli impianti CSP", sono state studiate le proprietà chimico-fisiche di fluidi costituiti da miscele bassofondenti di nitrati e nitriti (con sviluppo di relativi modelli termodinamici predittivi) insieme alle loro caratteristiche di stabilità chimica in temperatura e di compatibilità con materiali da costruzione. La campagna sulla stabilità termica ha evidenziato modelli di comportamento complessi; le prove di corrosione hanno fornito risultati di sicura utilità pratica ma si è evidenziata la necessità di completare il lavoro, estendendo il range delle temperature operative e dei materiali testati, al fine di verificare la compatibilità tra sali fusi bassofondenti e materiali da costruzione in condizioni reali di funzionamento (in flusso), individuando i materiali più promettenti in termini di costo e prestazioni. Nell'ambito della medesima tematica, sono stati anche investigati i nanofluidi, costituiti da un fluido base caricato con nanoparticelle, che hanno mostrato proprietà termiche incrementate rispetto ai fluidi base.

Nell'ambito della seconda tematica, inerente allo "sviluppo di componentistica avanzata per impianti CSP", sono stati sviluppati due prototipi di nuovi coating per tubi ricevitori di impianti CSP a collettori lineari (parabolici, Fresnel) depositati, mediante processi idonei alla produzione industriale, su tubi di acciaio di lunghezza 60 cm e diametro esterno 70 mm: (i) un prototipo di coating per tubi ricevitori di tipo evacuato e temperatura massima operativa di 550 °C, con prestazioni fototermiche e durabilità incrementate rispetto ai prodotti commerciali disponibili; (ii) un prototipo di coating per tubi ricevitori operanti in aria e temperatura massima operativa di 500 °C, con interessanti proprietà in termini di efficienza fototermica, stabilità ottica e chimico-strutturale. La ricerca sui tubi ricevitori è stata completata con lo sviluppo di un modello del tubo ricevitore (atto a simularne le perdite termiche) che ha permesso, tra l'altro, di confrontare la tecnologia del tubo evacuato con quella del tubo non evacuato, mostrando che le migliori prestazioni termiche del tubo evacuato ne giustificano il maggiore costo. Considerata l'incidenza della pulizia degli specchi sui costi operativi e di manutenzione (O&M) del campo solare degli impianti CSP, nell'ambito della tematica sulla componentistica avanzata per impianti CSP, sono stati sviluppati due rivestimenti che, agendo sulla bagnabilità degli specchi su cui sono depositati e senza inficiarne le proprietà riflettenti, sono in grado di rendere le superfici riflettenti autopulenti ovvero di limitare il consumo di acqua di lavaggio. Di entrambi i rivestimenti autopulenti, idrofobici e non fluorurati, uno idoneo per specchi ad architettura back surface (vetro metallizzato) e l'altro per specchi ad architettura front surface (pellicole polimeriche e/o substrati metallici), è stato fabbricato un prototipo di rivestimento in scala da laboratorio. Infine, mediante un apposito riflettometro portatile sono state eseguite misure periodiche della riflettanza degli specchi del collettore dell'impianto solare PCS sito nel C.R. ENEA di Casaccia ed è stata sviluppata una metodologia "on-field" per l'analisi dello sporco degli specchi. Sempre nell'ambito della seconda tematica, sono stati studiati nuovi sistemi di accumulo termico per impianti CSP di piccola taglia, più compatti e con costi ridotti, da adoperarsi in luogo del sistema di stoccaggio più diffuso in ambito CSP ovvero il doppio serbatoio con sali fusi come mezzo di accumulo. In primo luogo, sono stati sviluppati idonei modelli di analisi dei sistemi di accumulo in configurazione a singolo serbatoio di tipo termoclino a sali fusi (ovvero a sali fusi termicamente stratificati) e, in particolare, di un prototipo di un innovativo sistema termoclino a sali fusi con scambiatori di calore integrati, installato e testato sperimentalmente presso l'impianto sperimentale PCS del C.R. ENEA di Casaccia. I modelli sviluppati hanno consentito di esplorare nuove soluzioni in grado di migliorare le performance di tali sistemi di accumulo termoclino. Inoltre, sono stati studiati sistemi di accumulo termico basati su materiali adsorbenti (quali le zeoliti), alternativi ai sistemi di accumulo termico tradizionali a calore sensibile, in grado di scambiare calore termo-chimico durante le fasi di desorbimento e adsorbimento di vapore acqueo in condizioni di basso vuoto; i risultati ottenuti da una prima sperimentazione condotta a bassa temperatura (90-130 °C) su un prototipo di taglia significativa (1 m<sup>3</sup>), hanno evidenziato solo in parte le potenzialità del sistema (in termini di efficienza e densità di accumulo) che ci si aspetta essere molto più promettenti a temperature più elevate.

Nell'ambito della terza tematica, inerente al "calore di processo per applicazioni industriali", è stato condotto uno studio che ha consentito di stimare un costo medio attuale di circa 6 c€/kWh del calore a media/alta temperatura producibile con impianti solari a concentrazione in Italia; la voce di costo a maggiore incidenza è la fornitura del campo solare (25%-35%), seguita dall'accumulo termico (15%); riducendo il costo specifico del campo solare (dagli attuali 200 €/m<sup>2</sup> al target di 100 €/m<sup>2</sup>) il costo medio del calore prodotto può scendere fino a 4 c€/kWh. Nell'ambito della tematica sul calore di processo, sono state selezionate specifiche tecnologie solari termiche a concentrazione integrabili a processi industriali endotermici, identificando possibili combinazioni tra le diverse opzioni tecnologiche disponibili per i sottosistemi/elementi dell'impianto solare (collettori solari, fluidi termovettori, unità di accumulo di energia termica, interfaccia con l'utenza industriale, ecc.) e i processi endotermici di maggior interesse operativi nell'intervallo di temperatura 200-600 °C. Tra i processi industriali endotermici di particolare rilevanza per il tessuto produttivo nazionale, sono stati individuati quelli che per caratteristiche (in primis intensità energetica e livello di temperatura richiesto) risultano efficacemente alimentabili con sistemi CSP; anche con il supporto di dati sperimentali, per questi processi sono stati selezionati i parametri operativi ottimali per l'accoppiamento sinergico con calore solare e sono stati elaborati schemi di integrazione tra impianto solare e processo industriale, esaminando le seguenti opzioni tecnologiche: sistemi lineari (parabolici o Fresnel) utilizzando (i) olio diatermico come fluido termovettore per temperature medio-basse, (ii) miscele di sali fusi bassofondenti per temperature medie, (iii) miscele di sali fusi tipo "Solar Salt" per applicazioni ad alta temperatura. Le valutazioni tecnico-economiche eseguite dimostrano come tale integrazione permetta di risparmiare rilevanti quantità di combustibili

fossili e di attenuare le emissioni di CO<sub>2</sub> da processi industriali energivori, mantenendo la sostenibilità economica del processo a dispetto dei costi di realizzazione, gestione e accoppiamento tra impianto solare e processo industriale. Nell'ottica di supportare lo sviluppo e l'applicazione della tecnologia solare a concentrazione termica, è stato realizzato presso il C.R. ENEA di Casaccia un nuovo impianto solare sperimentale a collettori Fresnel, denominato "ENEA-SHIP", dedicato allo studio di soluzioni tecniche modulari, espandibili e facilmente integrabili per la fornitura di calore solare a utenze industriali.

Nell'ambito della quarta tematica, inerente all'"ibridizzazione e integrazione di impianti CSP con altre tecnologie energetiche", è stata sviluppata una metodologia per ottimizzare la progettazione di impianti ibridi CSP/PV e la loro gestione operativa. La metodologia ha determinato la taglia ottimale di ogni sottosistema dell'impianto ibrido CSP/PV (power block dell'impianto CSP, accumulo termico, accumulo elettrico a batterie, campo solare CSP, campo solare PV, ecc.) e ha individuato le soluzioni impiantistiche di integrazione tra CSP e PV più promettenti in termini tecnico-economici. La metodologia sviluppata è stata applicata a specifici casi studio d'interesse nazionale, considerando impianti di diversa taglia (con power block del CSP compreso tra 1 e 100 MWe), realizzati nel Sud Italia, cicli a vapore o ORC (in funzione della taglia del power block). Gli studi condotti hanno dimostrato che, a parità di profilo di carico elettrico considerato (costante o variabile), il beneficio derivante da un'ottimale integrazione tra impianti CSP e PV, rispetto a impianti CSP o PV puri, è evidente: in tutti i casi analizzati, infatti, l'impianto ibrido CSP/PV è in grado di soddisfare una quota della domanda elettrica imposta maggiore (fino a coprire anche oltre il 70% di un carico variabile ottenuto riscaldando la tipica curva di domanda elettrica nazionale), immettendo più energia nella rete elettrica e, allo stesso tempo, riducendo notevolmente (dal 10% al 30% a seconda del caso studio considerato) il costo dell'energia rinnovabile prodotta (LCOE). Ciò è possibile in quanto l'aggiunta di un componente relativamente semplice e dal basso costo specifico, quale il campo solare PV, permette di ridurre la taglia dei componenti più costosi della sezione CSP, quali il campo solare e il power block. Inoltre, la possibilità di convertire l'eccesso della produzione fotovoltaica in calore tramite resistenze elettriche inserite nel serbatoio di accumulo termico del CSP, sebbene termodinamicamente non efficiente, risulta vincente dal punto di vista economico in quanto permette di sfruttare l'accumulo termico del CSP (già presente e poco costoso) al posto delle batterie (il cui costo specifico è ancora elevato) per aumentare la dispacciabilità del PV.

### **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 "materiali e componenti avanzati per impianti CSP" – Con riferimento alla linea di ricerca sui coating innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti CSP a collettori lineari, lo sviluppo di coating a elevate prestazioni fototermiche e alta stabilità per tubi ricevitori evacuati da montare su collettori di tipo micro-PTC contribuirebbe a efficientare la produzione di energia, rendendo competitivo l'utilizzo della tecnologia del micro-CSP per la generazione distribuita di calore e/o elettricità in contesti civili e industriali. Inoltre, lo sviluppo di coating per tubi ricevitori solari evacuati con prestazioni fototermiche, ad alta temperatura, migliorate rispetto ai prodotti commerciali attualmente disponibili e al coating innovativo realizzato nell'ambito delle attività progettuali del precedente triennio favorirebbe una sempre maggiore diffusione della tecnologia degli impianti CSP di grande taglia, con applicazione di elezione la generazione centralizzata di energia elettrica. Per la linea di ricerca sulla tecnologia micro-CSP basata su sistemi di tipo micro-PTC per la generazione distribuita di energia in contesti civili e industriali, ci si aspetta di compiere uno step significativo grazie alle prestazioni del nuovo coating per tubo ricevitore per collettori micro-PTC, notevolmente più elevate rispetto a quelle del componente attualmente in dotazione al sistema micro-PTC proposto dal co-beneficiario UniFI (e anche rispetto a quelle di altri coating per tubi ricevitori per applicazioni tra 200 e 350 °C), soprattutto alle temperature più elevate del range di utilizzo esteso del suddetto sistema micro-PTC. Per la linea sulle superfici riflettenti autopulenti con sensoristica integrata per impianti CSP, le attività si configurano come il naturale prosieguo di quelle del precedente triennio della Ricerca di Sistema e si propongono di realizzare soluzioni autopulenti per specchi, anche in forma di prototipo di scala dimensionale compatibile con componenti d'impianti solari reali, che preservino le proprietà ottiche degli elementi riflettori, che siano fabbricabili attraverso tecniche economiche e scalabili e che in condizioni di esercizio preservino gli specchi da fenomeni abrasivi/corrosivi. Inoltre, alle soluzioni autopulenti sviluppate verranno aggiunte funzionalità sensoristiche idonee alla razionalizzazione delle operazioni di pulizia e, più in generale, al monitoraggio dinamico del livello di prestazione sia del singolo elemento che dell'intero campo solare. Per la linea sui sistemi di accumulo termo-chimico a zeoliti per applicazioni distribuite a media temperatura del CSP, le attività rappresentano il naturale prosieguo di quelle svolte nel precedente triennio della Ricerca di Sistema e si propongono di esplorare le potenzialità di applicazione di tale tecnologia di accumulo a temperature fino a 250 °C, alle quali ci si aspetta di raggiungere performance più elevate rispetto a quelle riscontrate a bassa temperatura.

Tematica "ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili" – Con riferimento alla linea di ricerca sui sistemi di accumulo termico, di tipo termocline, ibridizzati alimentabili da CSP e da altre tecnologie energetiche rinnovabili, per la produzione di calore per processi industriali, la realizzazione e successiva sperimentazione di un sistema di accumulo termocline ibridizzato con differenti tecnologie rinnovabili consente di sfruttare al meglio le fonti energetiche integrando differenti sezioni in modo da soddisfare la curva di domanda. Inoltre, attraverso la sperimentazione sarà possibile definire e mettere a punto le procedure di gestione del sistema di accumulo termico al fine poterlo accoppiare con processi industriali che necessitano di energia termica. Per la linea di ricerca sui sistemi innovativi di riscaldamento elettrico dei sali fusi per l'ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili, si intende confrontare le principali opzioni per il riscaldamento elettrico dei sali fusi, allo scopo di individuare quella più promettente e validarla



attraverso un dispositivo sperimentale su scala di laboratorio realizzato ad-hoc, sulla base del quale prevedere le prestazioni di un sistema full-scale che non risenta di limitazioni di potenza stringenti, come nel caso del riscaldamento per effetto Joule attraverso resistenze elettriche di tipo convenzionale immerse nei sali fusi, e assorba prontamente eccessi di produzione elettrica. Rispetto allo stato dell'arte, la linea sulla simulazione e ottimizzazione di impianti ibridi CSP/PV/Eolici di scala medio-piccola operanti sui mercati MGP e MSD presenta le seguenti novità: (1) verrà utilizzata una metodologia innovativa, rigorosa e replicabile per l'ottimizzazione combinata del design e dell'operation di impianti ibridi; (2) verrà considerata l'ibridizzazione sia con l'eolico che con il PV; (3) si terrà conto della possibilità di partecipare ai mercati dei servizi di dispacciamento/bilanciamento della rete elettrica (con relativi ritorni economici). Tematica "soluzioni tecniche e procedure operative per il settore industriale del CSP" – Con riferimento alla linea di ricerca sulle tecnologie ad ultrasuoni per sistemi di rilevazione di occlusioni solide all'interno del piping di impianti CSP utilizzando miscele di sali fusi come fluido termovettore, evidenziato che tale linea è completamente nuova rispetto a quelle sviluppate nel precedente triennio e non è ricompresa nello stato della tecnica, l'obiettivo è rendere disponibile una configurazione preliminare di un dispositivo basato sull'utilizzo della tecnologia ad ultrasuoni che, mediante l'invio di impulsi ultrasonori e la ricezione dei segnali riflessi dalle varie discontinuità presenti nel fluido termovettore nell'incipiente innesco e/o in seguito all'iniziale verificarsi del fenomeno della solidificazione della miscela di sali fusi, consenta di determinare la formazione e la posizione di occlusioni solide nel piping degli impianti CSP con tecnologia ENEA a sali fusi (ovvero con collettori lineari parabolici, PTC, o Fresnel, LFC, e miscele di sali fusi adoperati come fluido termovettore e materiale di accumulo in serbatoi di stoccaggio dell'energia termica); la potenziale disponibilità di siffatto dispositivo di diagnosi, semplificando la gestione operativa degli impianti PTC e LFC a sali fusi, contribuirebbe al superamento delle resistenze (tuttora esistenti) nell'implementare diffusamente tale tecnologia e, al contempo, avrebbe ricadute positive anche in termini di miglioramento della bancabilità di tali impianti. Per la linea di ricerca sulle procedure operative per impianti CSP con fluido termovettore costituito da miscela di sali fusi bassofondenti e studio della compatibilità dei materiali a contatto con le miscele in condizioni reali di funzionamento, si intende effettuare una serie di prove di corrosione tra differenti acciai e miscele di sali ternarie e quaternarie bassofondenti al fine di poter impiegare queste ultime sia come fluido termovettore che come mezzo di accumulo in impianti CSP, andando in questo modo a semplificarne la gestione per quanto riguarda il limite inferiore di congelamento del fluido. Attraverso la circolazione delle miscele all'interno di un circuito dedicato sarà possibile, inoltre, analizzare e mettere a punto delle procedure operative da seguire in campo in particolari fasi di funzionamento dell'impianto.

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

Alcune delle attività di ricerca della presente proposta di 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 della presente proposta di Progetto sono di seguito riportati.

- 1) Il progetto SolarGrid (anni 2020-2023, finanziato dal PNR 2015-2020) prevede 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 è in fase di completamento lo sviluppo di nuovi coating solari per tubi ricevitori operanti in aria fino a 800 °C e di soluzioni per superfici riflettenti autopulenti.
- 2) Il progetto EuroPatMoS (anni 2020-2023, finanziato nell'ambito della prima call EU CSP ERANET) prevede attività di studio, test e valutazione di componenti critici e procedure di controllo per impianti CSP con tecnologia PTC a sali fusi.
- 3) 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, 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), come soluzione vantaggiosa per produrre elettricità/calore rinnovabile on-demand.
- 4) 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, fra l'altro, procedure per la qualifica delle prestazioni di collettori solari e di materiali e componenti di sistemi di accumulo termico.
- 5) 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.
- 6) Il progetto europeo MATS (anni 2011-2018, finanziato dal FP7) era finalizzato a sviluppare e realizzare un impianto CSP di tipo PTC multigenerativo, con fluido termovettore costituito da "Solar Salt" e sistema di accumulo termico diretto di tipo termoclino con generatore di vapore integrato.
- 7) Nell'ambito del progetto europeo STS-Med (anni 2013-2016, finanziato dal programma ENPI CBC Med) sono stati sviluppati e realizzati prototipi di sistemi CSP 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.

8) 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.

9) 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.

10) Nel progetto SUNSTORE (anni 2017-2021, finanziato dal Bando 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.

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 "materiali e componenti avanzati per impianti CSP" – Con riferimento alla linea di ricerca sui coating innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti CSP a collettori lineari, saranno sviluppati coating a elevate prestazioni fototermiche e stabilità per applicazioni di destinazione e condizioni operative del tutto differenti rispetto a quelle del progetto SolarGrid, essendo tali nuovi coating solari destinati (i) a tubi ricevitori evacuati per sistemi di tipo micro-PTC, operanti fino a  $350\text{ °C}$ , e (ii) a tubi ricevitori evacuati per impianti CSP di grande taglia, operanti ad alta temperatura (fino a  $550\text{ °C}$ ). Per la linea di ricerca sulla tecnologia micro-CSP basata su sistemi di tipo micro-PTC per la generazione distribuita di energia in contesti civili e industriali, si ritiene sufficiente sviluppare soluzioni per l'operatività di un innovativo sistema micro-PTC limitata a  $350\text{ °C}$  per consolidare le altre scelte tecnologiche che hanno portato alla miniaturizzazione di tanti componenti in ottica futura di aumento delle temperature di funzionamento; tale limite di temperatura massima è comunque funzionale ad ampliare il settore di applicazione delle tecnologie CSP anche a settori industriali "hard to abate" presenti in contesti fortemente antropizzati dove le dimensioni dei sistemi tradizionali CSP impedisce l'utilizzo di questi sistemi. Per la linea sulle superfici riflettenti autopulenti con sensoristica integrata per impianti CSP, saranno sviluppate nuove soluzioni autopulenti, diverse da quelle implementate nel progetto SolarGrid (in cui i rivestimenti autopulenti, specificamente pensati per pellicole specchianti polimeriche da utilizzarsi in impianti di piccola taglia, sono stati depositati in scala di laboratorio) perché idonee non solo a diminuire il consumo di acqua di lavaggio degli specchi solari, ma anche a preservarne le proprietà ottiche ed evitarne il degrado in esercizio per fenomeni abrasivi/corrosivi; inoltre, le nuove soluzioni autopulenti saranno realizzate, mediante tecniche di deposizione economiche di potenziale interesse industriale, anche su una scala dimensionale compatibile con componenti d'impianti solari reali; infine, come attività qualificante e fortemente distintiva rispetto alle attività di SolarGrid, verranno studiati e fabbricati elementi sensoristici, integrabili nei layer autopulenti, idonei alla razionalizzazione delle operazioni di pulizia e più in generale al monitoraggio dinamico del livello di prestazione sia del singolo elemento riflettente che dell'intero campo solare. Per la linea sui sistemi di accumulo termo-chimico a zeoliti per applicazioni distribuite a media temperatura del CSP, saranno studiate e sviluppate soluzioni impiantistiche più evolute ed efficienti rispetto a quelle implementate nel progetto Sunstore con l'obiettivo di accumulare calore a temperature fino a  $250\text{ °C}$ ; inoltre il nuovo sistema verrà sperimentato in accoppiamento ad un impianto ad olio diatermico per analizzare nel dettaglio le dinamiche di carica/scarica del serbatoio in condizioni operative tipiche di applicazioni per la produzione di calore di processo.

Tematica "ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili" - Alcuni dei risultati conseguiti nell'ambito dei progetti europei MATS, ORC-PLUS e STS-Med, nei quali sono state studiate soluzioni di integrazione della fonte solare con combustibili fossili e configurazioni di impianto di tipo poligenerativo, saranno utili per lo sviluppo delle linee di ricerca sull'ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili. Inoltre, con particolare riferimento alle attività di ricerca sull'ibridizzazione tra CSP e PV, queste potranno beneficiare degli studi e dei risultati conseguiti nell'ambito del progetto WOW-SUN. In particolare, per quanto attiene alla ricerca sui sistemi di accumulo termico, di tipo termoclino, ibridizzati, alimentabili da CSP e da altre tecnologie energetiche rinnovabili e funzionali alla fornitura di calore per processi industriali, verrà valorizzata l'esperienza maturata da ENEA nella realizzazione di prototipi su scala ridotta nell'ambito dei progetti STS-Med, ORC-PLUS e RESLAG. Per la linea di ricerca sui sistemi innovativi di riscaldamento elettrico dei sali fusi per l'ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili, ENEA ha avviato, nell'ambito del progetto WOW-SUN, un'attività di studio e progettazione di un sistema di accumulo termoclino a sali fusi bassofondenti, dotato di resistenze elettriche immerse per la conversione di elettricità in calore, destinato ad immagazzinare sia energia termica da CSP, 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. Per la linea sulla simulazione e ottimizzazione di impianti ibridi CSP/PV/Eolici di scala medio-piccola operanti sui mercati MGP e MSD, si possono evidenziare sinergie con il progetto "Model Intercomparison and Case Studies Concerning Hybrid CSP-TES/PV-Battery Systems" finanziato da SolarPACES nell'ambito del Task I coordinato da NREL che vede la partecipazione di POLIMI, DLR e KTH.

Tematica "soluzioni tecniche e procedure operative per il settore industriale del CSP" – Con riferimento alla linea di ricerca sulle tecnologie ad ultrasuoni per sistemi di rilevazione di occlusioni solide all'interno del piping di impianti CSP utilizzando miscele di sali fusi come fluido termovettore, 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 che, peraltro, è completamente nuova anche rispetto a quelle sviluppate nel precedente triennio di Progetto 1.9 (PTR 2019-2021). Per la linea di ricerca sulle procedure operative per impianti CSP con fluido termovettore costituito da miscele di sali fusi bassofondenti e studio della compatibilità dei materiali a contatto con le miscele in

condizioni reali di funzionamento, nell'ambito del progetto europeo EU-SFERA III ENEA ha lavorato alla messa a punto di metodologie e strumenti per la misurazione della corrosione di componenti e sottosistemi degli impianti CSP derivante dall'utilizzo di fluidi termici avanzati; inoltre, lo sviluppo e lo studio della stabilità termica di nuove miscele di sali fusi sono stati condotti da ENEA nei progetti europei ORC-PLUS e IN-POWER; infine, attività di studio inerenti alle procedure di controllo d'impianti CSP con tecnologia PTC a sali fusi e caratterizzazione di componenti sono state condotte nell'ambito del progetto EuroPatMoS.

## 2.5 Obiettivi e risultati

### a) Obiettivi finali del progetto

Il solare termodinamico (o Concentrating Solar Power, CSP) è una tecnologia che grazie ai sistemi di accumulo termico, per natura poco costosi e senza particolari limitazioni di capacità o durata, è in grado di generare e immettere in rete energia elettrica rinnovabile dispacciabile, permettendo di superare alcune criticità inerenti alla gestione di un sistema energetico sempre più basato sulla generazione da fonti rinnovabili aleatorie, quali solare fotovoltaico (PV) ed eolico, dando un contributo significativo alla decarbonizzazione del sistema energetico. In particolare, l'opportuna ibridizzazione tra impianti CSP e PV/eolici offre la possibilità di combinare i bassi costi di generazione dell'energia da PV/eolico con l'immissione programmabile in rete da CSP di grandi quantità di elettricità rinnovabile preservando, al contempo, la stabilità e l'affidabilità della rete elettrica e riducendo drasticamente i costi complessivi del sistema energetico. L'energia termica immagazzinata nei sistemi di accumulo degli impianti CSP, oltre che convertita in elettricità mediante cicli termodinamici, può essere utilizzata direttamente (i) per fornire calore di processo all'industria, contribuendo alla capillare decarbonizzazione di settori industriali attualmente serviti da tecnologie energetiche convenzionali utilizzando combustibili fossili, o (ii) per applicazioni civili di climatizzazione degli ambienti mediante solar heating & cooling. Chiaramente, per sua natura, il CSP si presenta anche come tecnologia di elezione per soluzioni cogenerative e trigenerative, sia centralizzate che distribuite, per la fornitura di elettricità/calore/energia frigorifera a utenze industriali e civili.

Nell'ambito descritto, il presente Progetto 1.9 "Solare termodinamico" si pone come obiettivo prioritario la riduzione prospettica del costo di generazione dell'energia, in primis elettrica ma anche termica, degli impianti CSP tal quali ovvero ibridizzati con altre tecnologie da fonti energetiche rinnovabili (FER), sviluppando e sperimentando e/o applicando, in prototipi dimostrativi, materiali, componenti, sistemi, soluzioni tecniche e metodologie avanzate che siano in grado di incrementare le prestazioni, e quindi la producibilità, degli impianti CSP e ridurre le spese operative e di manutenzione. In particolare, il Progetto si propone di contribuire al raggiungimento del target di breve e medio periodo stabilito nella bozza in revisione del "CSP Implementation Plan (CSP-IP) del SET-Plan" per il costo livellato dell'elettricità (LCOE) prodotta da CSP, pari a meno di 15 c€/kWh nelle località dell'Europa meridionale entro il 2025, con un obiettivo inferiore a 10 c€/kWh entro il 2030, considerando condizioni di irraggiamento di riferimento di 2050 kWh/m<sup>2</sup>/anno.

Tenuto conto che gli impianti Noor I-II-III-IV realizzati in Marocco hanno dimostrato che la combinazione tra impianti CSP e PV, opportunamente integrati tramite sistemi di accumulo di energia termica alimentati da CSP e PV, consente di ridurre drasticamente il costo di generazione dell'elettricità, un ulteriore obiettivo prioritario del Progetto è lo sviluppo e la sperimentazione di innovativi sistemi (con particolare riferimento a nuovi sistemi di accumulo termico a sali fusi), soluzioni tecniche e metodologiche per l'efficace ibridizzazione del CSP con altre tecnologie FER, con particolare riferimento a PV e/o eolico.

Anche in considerazione delle azioni R&I prioritarie individuate nella suddetta bozza in revisione del CSP-IP del SET-Plan, un ulteriore obiettivo del Progetto è di sviluppare e sperimentare componenti e sistemi innovativi per la produzione, sia centralizzata che distribuita, e la fornitura di calore a media e alta temperatura per applicazioni SHIP (Solar Heat Industrial Processes); inoltre, il Progetto si propone di rendere disponibili componenti e sistemi, preferibilmente integrabili negli edifici, per la generazione/cogenerazione/trigenerazione distribuita di elettricità e/o calore e/o energia frigorifera per utenze industriali e civili.

Infine, su sollecitazione del settore industriale del CSP, un ulteriore obiettivo prioritario del Progetto è lo sviluppo di soluzioni tecniche e procedure studiate ad hoc per impianti CSP con "tecnologia ENEA a sali fusi" (ovvero a collettori lineari parabolici o Fresnel e utilizzanti miscele di sali fusi come fluido termovettore e materiale per l'accumulo) con la finalità di semplificare la gestione operativa (ad oggi piuttosto complessa) e, in prospettiva, di migliorare la bancabilità di tali impianti che promettono indubbi vantaggi rispetto alla tecnologia più convenzionale "ad olio", sia in termini di efficienza che di sostenibilità ambientale.

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 "materiali e componenti avanzati per impianti CSP" – Con riferimento alla linea di ricerca sui coating innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti CSP a collettori lineari, l'obiettivo finale è di rendere disponibile un coating per tubi ricevitori solari evacuati di impianti CSP a collettori lineari (parabolici, Fresnel) per applicazioni ad alta temperatura ( $\leq 550$  °C), con prestazioni fototermiche incrementate (assorbanza solare  $\alpha_s > 95.10\%$ , ed emissività termica  $\epsilon_{th} < 8.50\%$  a 550 °C) rispetto allo stato dell'arte della tecnica costituito dal coating di ultima generazione realizzato nel precedente triennio di Progetto ( $\alpha_s = 95.10\%$ , e  $\epsilon_{th} = 9.87\%$  a 550 °C), stabile per una vita utile di almeno 25 anni. L'impiego di tubi ricevitori evacuati dotati di nuovi coating dalle prestazioni fototermiche migliorate consentirebbe di incrementare l'efficienza di generazione dell'energia degli impianti solari CSP di grande taglia; a titolo di esempio, le stime effettuate con il simulatore SAM sulla producibilità annuale di energia di un impianto di 50 MWe a sali fusi e con accumulo termico di 8h, mostrano che, a parità di dimensioni del campo solare e rispetto ai migliori tubi ricevitori presenti sul mercato, il tubo ricevitore con

le prestazioni fototermiche target minimo del Progetto ( $\alpha_s = 95.10\%$ , e  $\epsilon_{th} = 8.50\%$  a  $550^\circ\text{C}$ ) consentirebbe un incremento dell'energia prodotta tra il 5% e il 10%, a seconda della localizzazione dell'impianto CSP nella fascia solare del Mediterraneo. Analogamente, si vogliono rendere disponibili coating innovativi a elevate prestazioni fototermiche e alta stabilità per tubi ricevitori evacuati da montare su impianti micro-CSP di tipo micro-PTC di nuova generazione. L'obiettivo è di realizzare un coating a media temperatura ( $\leq 350^\circ\text{C}$ ) con  $\alpha_s > 96\%$ ,  $\epsilon_{th} < 7.5\%$  a  $350^\circ\text{C}$ , stabile per una vita utile di almeno 25 anni, al fine di migliorare la producibilità di calore ed elettricità degli impianti micro-CSP, supportando la diffusione di questa nuova tecnologia solare a concentrazione. Per la linea di ricerca sulla tecnologia micro-CSP basata su sistemi di tipo micro-PTC per la generazione distribuita di energia in contesti civili e industriali, il principale obiettivo finale è individuare possibili soluzioni tecniche di up-grade per un prototipo di un innovativo sistema micro-PTC, proposto dal co-beneficiario UniFI, finalizzate a migliorarne le prestazioni, incrementarne la temperatura operativa fino a  $350^\circ\text{C}$  per impiego cogenerativo (produzione di calore di processo tra  $200$  e  $350^\circ\text{C}$  e di elettricità con cicli ORC a temperatura massima di  $350^\circ\text{C}$ ) e facilitarne l'integrazione in strutture edilizie e l'industrializzazione. Per la linea sulle superfici riflettenti autopulenti con sensoristica integrata per impianti CSP, l'obiettivo specifico è sviluppare specchi solari predisposti all'integrazione di opportuna sensoristica mirata alla razionalizzazione delle procedure di ordinaria manutenzione del campo solare, attraverso l'inserimento di step alternativi e/o aggiuntivi a basso costo nei processi produttivi (ad esempio la sostituzione degli strati esposti con strati autopulenti che integrino piccole aree "interrogabili"). Inoltre, si vogliono adoperare tecniche di deposizione scalabili a livello industriale (quali lo sputtering, e/o lo spray, e/o la stampa) per fabbricare ed integrare sensori nel ciclo produttivo di specchi solari di nuova concezione, che possano essere contemporaneamente autopulenti ed interrogabili rispetto al livello di sporco e in generale al deterioramento delle prestazioni in esercizio. Per la linea sui sistemi di accumulo termo-chimico a zeoliti per applicazioni distribuite a media temperatura del CSP, l'obiettivo principale che si intende perseguire è lo sviluppo di sistemi innovativi di accumulo termico ad alta efficienza e dai costi competitivi che permettano di ottimizzare i processi di produzione di energia termica generata da sistemi CSP a media temperatura ( $T < 250^\circ\text{C}$ ), 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 "ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili" – Con riferimento alla linea di ricerca sui sistemi di accumulo termico, di tipo termocline, ibridizzati alimentabili da CSP e da altre tecnologie energetiche rinnovabili, per la produzione di calore per processi industriali, l'obiettivo è mettere a punto un sistema di accumulo termico in grado di essere alimentato da differenti fonti rinnovabili in modo, così, da assicurare una fornitura costante nel tempo di calore ad un determinato processo industriale. L'inserimento all'interno del sistema di accumulo di differenti scambiatori di calore permette di riscaldare il mezzo di accumulo sia con differenti fonti energetiche che in tempi diversi, al fine di disaccoppiare la fornitura sia di calore che di eventuale energia elettrica dalle fonti rinnovabili ed ottenere così una produzione continua per un tempo più lungo riducendo, quindi, l'utilizzo di fonti energetiche convenzionali. Per la linea di ricerca sui sistemi innovativi di riscaldamento elettrico dei sali fusi per l'ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili, la disponibilità di un sistema di conversione elettro-termica ad alta efficienza e senza limitazioni di potenza, idoneo all'integrazione con accumuli termici a sali fusi, consentirebbe di assorbire gli eccessi di produzione da rinnovabili a livello locale o sulla rete sfruttando le infrastrutture degli impianti CSP, integrando l'azione delle batterie elettriche, ma con costi inferiori e a minor impatto ambientale. Per la linea sulla simulazione e ottimizzazione di impianti ibridi CSP/PV/Eolici di scala medio-piccola operanti sui mercati MGP e MSD, i risultati ottenuti permetteranno di identificare la miglior tipologia di impianto ibrido di scala medio/piccola adatta al contesto italiano e di valutare quantitativamente la capacità degli impianti ibridi sia di fornire energia elettrica dispacciabile, sia di fornire servizi ancillari di bilanciamento alla rete. Tali risultati forniranno al gestore del sistema elettrico nazionale uno strumento per valutare la capacità degli impianti ibridi di superare i problemi legati alla non programmabilità di impianti fotovoltaici ed eolici. Inoltre, 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 ibridi.

Tematica "soluzioni tecniche e procedure operative per il settore industriale del CSP" - Con riferimento alla linea di ricerca sulle tecnologie ad ultrasuoni per sistemi di rilevazione di occlusioni solide all'interno del piping di impianti CSP utilizzando miscele di sali fusi come fluido termovettore, la disponibilità di un dispositivo basato sull'utilizzo della tecnologia ad ultrasuoni in grado di determinare presenza, posizione e, preferibilmente, incipiente formazione di occlusioni solide di sali nel piping degli impianti, senza la necessità di apertura delle linee e fermo impianto, contribuirebbe in modo significativo all'affermazione e diffusione degli impianti solari a concentrazione, termici e termodinamici, con "tecnologia ENEA a sali fusi". Per la linea di ricerca sulle procedure operative per impianti CSP con fluido termovettore costituito da miscele di sali fusi bassofondenti e studio della compatibilità dei materiali a contatto con le miscele in condizioni reali di funzionamento, l'ottimizzazione delle procedure operative di particolari fasi (quali ad esempio riempimento e drenaggio) nel normale funzionamento di un impianto solare a concentrazione consentirebbe una gestione dello stesso più controllata riuscendo, in questo modo, ad ottenere una maggior efficienza di conversione dell'energia ed un migliore sfruttamento della frazione solare. Attraverso poi i risultati delle prove di corrosione su differenti acciai, è possibile allargare il ventaglio di materiali utilizzabili per la realizzazione degli impianti CSP con un possibile abbassamento dei costi di investimento iniziali.

## b) Principali risultati attesi/deliverable

I risultati attesi del Progetto 1.9 "Solare termodinamico" sono di diversa natura (principalmente analisi, elaborazione di scenari, modelli,

procedure, risultati sperimentali, nuove tecnologie/soluzioni tecniche, miglioramento o nuove applicazioni di tecnologie/soluzioni tecniche esistenti, prototipi) a seconda delle diverse linee di ricerca. Dove non espressamente indicato (ad esempio nel caso della realizzazione di prototipi), i risultati saranno presentati all'interno di specifici report tecnici.

Di seguito si riportano risultati attesi/deliverable specifici per ogni linea di ricerca del Progetto, inserita nell'ambito della tematica scientifico-applicativa di riferimento.

Tematica "materiali e componenti avanzati per impianti CSP" – Con riferimento alla linea di ricerca sui coating innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti CSP a collettori lineari, il primo risultato atteso consiste nella realizzazione di un prototipo di un coating innovativo, a elevate prestazioni fototermiche e alta stabilità, per tubo ricevitore evacuato operante alla temperatura massima di 350 °C, depositato su tubo di acciaio di diametro esterno 10 mm, spessore di parete 1 mm e lunghezza dell'ordine dei 500 mm; il secondo risultato atteso consiste nella realizzazione di un prototipo di un coating innovativo, con prestazioni fototermiche migliorate ad alta temperatura, per tubo ricevitore evacuato operante alla temperatura massima di 550 °C, depositato su tubo di acciaio di diametro esterno 70 mm, spessore di parete 2 o 3 mm e lunghezza dell'ordine dei 500 mm. Per la linea di ricerca sulla tecnologia micro-CSP basata su sistemi di tipo micro-PTC per la generazione distribuita di energia in contesti civili e industriali, i risultati saranno costituiti da un'analisi del potenziale applicativo della tecnologia micro-CSP basata su sistemi di tipo micro-PTC per la generazione distribuita di calore, elettricità ed energia frigorifera in contesti civili e industriale, con particolare riferimento ad aree urbane situate nelle principali macroaree del territorio italiano (Nord, Centro, Sud/Isole); inoltre, sulla base di risultati sperimentali di prove di laboratorio e test in campo di un innovativo sistema micro-PTC, sviluppato e realizzato da UniFI in attività di ricerca antecedenti a quelle di Progetto, sarà prodotto uno studio progettuale di up-grade di tale sistema micro-PTC atto a migliorarne le prestazioni e a estenderne il campo di applicazione (cogenerazione di calore di processo nel range di temperatura 200-350 °C e di energia elettrica con cicli ORC con temperatura operativa massima di 350 °C). Per la linea sulle superfici riflettenti autopulenti con sensoristica integrata per impianti CSP, i risultati attesi sono costituiti da innovativi rivestimenti autopulenti per specchi solari a base di nano-compositi ibridi trasparenti, che resi conduttivi (in toto o in parte) possano integrare sensori, a loro volta concepiti e fabbricati nel corso del Progetto, consentendo di limitare il costo delle operazioni di ordinaria manutenzione (anche attraverso una loro razionalizzazione) e nel contempo preservare la funzionalità in esercizio del componente; nella fattispecie, saranno resi disponibili un prototipo di specchio autopulente di dimensioni compatibili con impianti solari sperimentali, predisposto all'integrazione di sensori, e un prototipo di sensore. Per la linea sui sistemi di accumulo termo-chimico a zeoliti per applicazioni distribuite a media temperatura del CSP, si intende mettere a punto una facility di test per la caratterizzazione di accumuli termo-chimici ad adsorbimento fino a 250 °C che consenta di valutare le potenzialità di utilizzo di tali tecnologie, attraverso l'acquisizione di dati sperimentali in diverse 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.

Tematica "ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili" – Con riferimento alla linea di ricerca sui sistemi di accumulo termico, di tipo termocline, ibridizzati alimentabili da CSP e da altre tecnologie energetiche rinnovabili, per la produzione di calore per processi industriali, i risultati saranno rappresentati dalla realizzazione di un prototipo di sistema di accumulo ibridizzato; sulla base poi delle attività di sperimentazione condotte sul prototipo verranno eseguite analisi al fine di ottimizzare la fornitura di calore di processo/energia elettrica da fonte rinnovabile. Per la linea di ricerca sui sistemi innovativi di riscaldamento elettrico dei sali fusi per l'ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili, si prevede di trasferire tecnologie di riscaldamento del tipo resistivo, a induzione e/o micro-onde, all'impiantistica dei sistemi di accumulo termico degli impianti CSP, sia per incrementare la capacità di risposta degli accumuli a sali (aumentando la potenza elettrica trasferibile ai sali oltre 100 W/kg), sia per "caricare" termicamente gli accumuli a sali indipendentemente dalla loro temperatura di partenza (attualmente non è possibile trasferire ai sali ad alta temperatura una potenza elettrica significativa a causa dei limiti termici sull'elemento scaldante, che deve avere temperatura sempre inferiore ai 550 °C per evitare la degradazione termica dei sali a contatto); verranno pertanto elaborate delle soluzioni ingegneristiche alternative di riscaldamento dei sali fusi, con lo sviluppo di modelli di analisi a livello di componente e di sistema, e verrà realizzato un proof of concept su scala di laboratorio. Per la linea sulla simulazione e ottimizzazione di impianti ibridi CSP/PV/Eolici di scala medio-piccola operanti sui mercati MGP e MSD, i risultati principali consistono: (i) nello sviluppo di modelli di power block basati su tecnologia Rankine a vapor d'acqua e a fluido organico a taglia ottimizzata in grado di simulare le prestazioni di design e di off-design, (ii) nello sviluppo di algoritmi di ottimizzazione del design e dell'operation di impianti ibridi CSP/PV/Eolici per il funzionamento sia sul Mercato del Giorno Prima (MGP) che sul Mercato dei Servizi di Dispacciamento (MSD) e (iii) nell'applicazione dei suddetti modelli ed algoritmi per identificare dei design ottimizzati in funzione di diversi scenari di prezzi dell'energia elettrica.

Tematica "soluzioni tecniche e procedure operative per il settore industriale del CSP" - Con riferimento alla linea di ricerca sulle tecnologie ad ultrasuoni per sistemi di rilevazione di occlusioni solide all'interno del piping di impianti CSP utilizzando miscele di sali fusi come fluido termovettore, il principale risultato è la verifica, mediante analisi teorico-numeriche, della possibilità di impiegare efficacemente le tecnologie ad ultrasuoni per l'innovativa applicazione in oggetto nonché lo sviluppo di una configurazione preliminare di un apposito dispositivo per la diagnosi "in remoto" dello stato dei sali fusi sia in tubazioni rettilinee che in prossimità di pezzi speciali. Per la linea di ricerca sulle procedure operative per impianti CSP con fluido termovettore costituito da miscele di sali fusi bassofondenti e studio della compatibilità dei materiali a contatto con le miscele in condizioni reali di funzionamento, si prevede di elaborare delle procedure ottimizzate per la gestione di particolari fasi di funzionamento degli impianti CSP che utilizzano come fluido termovettore miscele bassofondenti di sali ternari, per applicazioni nel range di temperatura 200-400 °C, e quaternari per applicazioni ad alte temperature

(400-600 °C). Inoltre, si prevede anche di verificare la compatibilità di alcuni acciai con le predette miscele di sali al fine del loro impiego nella costruzione di impianti CSP.

## 2.6 Fattibilità tecnico-scientifica

### a) Fattibilità tecnico-scientifica

Il Progetto 1.9 "Solare termodinamico" del PTR 2022-2024 della RdS 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 "materiali e componenti avanzati per impianti CSP" prevede le seguenti 4 linee di ricerca:

- coating innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti CSP a collettori lineari, costituita da 3 LA (LA1.1, LA1.2 in carico a ENEA e LA1.3 in carico a UniPA);
- tecnologia micro-CSP basata su sistemi di tipo micro-PTC per la generazione distribuita di energia in contesti civili e industriali, costituita da 3 LA (LA 1.4, LA1.6 in carico a UniFI e LA1.5 in carico a ENEA);
- superfici riflettenti autopulenti con sensoristica integrata per impianti CSP, costituita da 3 LA (LA1.7, LA1.8, LA1.9 in carico a ENEA);
- sistemi di accumulo termo-chimico a zeoliti per applicazioni distribuite a media temperatura del CSP, costituita da 1 LA (LA1.10 in carico a ENEA).

La seconda tematica inerente all'"ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili" prevede le seguenti 3 linee di ricerca:

- sistemi di accumulo termico, di tipo termoclino, ibridizzati alimentabili da CSP e da altre tecnologie energetiche rinnovabili, per la produzione di calore per processi industriali", costituita da 4 LA (LA1.11, LA1.13 in carico a ENEA e LA1.12, LA1.14 in carico a PoliTO);
- sistemi innovativi di riscaldamento elettrico dei sali fusi per l'ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili, costituita da 4 LA (LA1.15, LA1.17 in carico a ENEA e LA1.16, LA1.18 in carico a PoliTO);
- simulazione e ottimizzazione di impianti ibridi CSP/PV/Eolici di scala medio-piccola operanti sui mercati MGP e MSD, costituita da 1 LA (LA1.19 in carico a PoliMI).

La terza tematica inerente a "soluzioni tecniche e procedure operative per il settore industriale del CSP" prevede le seguenti 2 linee di ricerca:

- tecnologie ad ultrasuoni per sistemi di rilevazione di occlusioni solide all'interno del piping di impianti CSP utilizzando miscele di sali fusi come fluido termovettore, costituita da 1 LA (LA1.20 in carico a UniNA);
- procedure operative per impianti CSP con fluido termovettore costituito da miscele di sali fusi bassofondenti e studio della compatibilità dei materiali a contatto con le miscele in condizioni reali di funzionamento, costituita da 4 LA (LA1.21, LA1.23 in carico a ENEA e LA1.22, LA1.24 in carico a UniRM2).

Infine, per la "comunicazione e disseminazione dei risultati" del Progetto sono previste 2 LA (LA1.25, LA1.26 in carico a ENEA).

Nell'insieme il Progetto, a fronte di un investimento totale richiesto di 2,3 M€, consentirà di generare risultati, avanzamenti tecnologici e ricadute di grande significatività sia sull'industria di settore che sul sistema energetico nazionale, attraverso la realizzazione o il potenziamento di:

- i) dimostratori tecnologici (quali l'impianto ENEA-SHIP, realizzato nel precedente triennio, implementato con un nuovo prototipo di sistema di accumulo termoclino ibridizzato, e il circuito sperimentale MoSE dell'ENEA, modificato e caricato con miscele di sali fusi bassofondenti) 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) prototipi e sistemi su scala di laboratorio (quali due prototipi di coating solari per applicazioni a media e alta temperatura, depositati su tubi commerciali di acciaio, un prototipo di superficie riflettenti autopulenti di dimensioni compatibili specchi di impianti solari sperimentali, un reattore termo-chimico a zeoliti modificato per accumulo a temperature fino a 250 °C) che permetteranno di convalidare le soluzioni ingegneristiche selezionate e di estrapolare, attraverso modelli e analisi numeriche, le caratteristiche operative di componenti e sistemi su scala reale;
- iii) prototipi e dispositivi "proof of concept" (quali il dispositivo sperimentale per riscaldamento elettrico innovativo dei sali fusi e i sensori disporcamento/failure) che consentiranno di studiare e verificare il comportamento dei materiali e dei fenomeni fisici coinvolti nelle attività di sviluppo a basso TRL, aprendo la strada a nuove prospettive applicative (quali accumulo a basso costo dell'elettricità in eccesso da PV/eolico/rete, utilizzo di sensori "parlanti" integrabili all'interno di rivestimenti superficiali per molteplici applicazioni in campo energetico, dell'edilizia, del monitoraggio ambientale in contesti civili e siti industriali, ecc.).

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

Tematica "materiali e componenti avanzati per impianti CSP" – Con riferimento alla linea di ricerca sui coating innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti CSP a collettori lineari, si prevede lo sviluppo di materiali innovativi per la realizzazione di coating solari a elevate prestazioni fototermiche e ad alta stabilità per tubi ricevitori evacuati da montare su sistemi di tipo micro-PTC operanti a temperature

massime comprese nell'intervallo 200-350 °C, da impiegarsi per la generazione distribuita di energia in contesti civili e industriali; nella fattispecie, i materiali saranno realizzati mediante la tecnologia di deposizione tipo co-sputtering del doppio nitrato, di cui ENEA detiene un brevetto, particolarmente adatta alla produzione industriale poiché caratterizzata da processi di deposizione semplici, robusti, a basso costo e con alta velocità di deposizione. Si prevede, inoltre, lo sviluppo di strutture innovative in grado di stabilizzare ad alta temperatura (550 °C) un materiale come l'argento che, per la sua elevata riflettanza, rappresenta la soluzione ottimale per minimizzare le dispersioni termiche dei tubi ricevitori; queste strutture, una volta inserite nei coating solari, consentiranno di migliorarne le prestazioni fototermiche ad alta temperatura (550 °C), con un degrado delle prestazioni nel tempo pari o inferiore a quello dei coating realizzati con le tecnologie attuali più avanzate. Per la linea di ricerca sulla tecnologia micro-CSP basata su sistemi di tipo micro-PTC per la generazione distribuita di energia in contesti civili e industriali, si svilupperanno soluzioni tecnologiche per i micro-PTC mutate dai sistemi CSP operanti a media/alta temperatura. Per la linea sulle superfici riflettenti autopulenti con sensoristica integrata per impianti CSP, a partire da una piattaforma realizzativa di rivestimenti autopulenti compatibili con le proprietà ottiche degli specchi solari sia di architettura BSM (back surface mirrors) che FSM (front surface mirrors), l'attività di ricerca prevederà la fabbricazione di prototipi di specchi autopulenti di dimensioni compatibili con l'impianto solare sperimentale Fresnel, denominato ENEA-SHIP e installato presso il C.R. ENEA di Casaccia, e l'aggiunta nelle rispettive formulazioni di aree "sensibili" contenenti filler conduttivi e/o sensori piezoelettrici integrabili nei processi di fabbricazione. Per la linea sui sistemi di accumulo termo-chimico a zeoliti per applicazioni distribuite a media temperatura del CSP, è previsto lo sviluppo ed ottimizzazione del sistema di generazione/condensazione del vapore in condizioni di basso vuoto, al fine di velocizzare i processi di adsorbimento/desorbimento che avvengono nel reattore a zeoliti durante le fasi di carica e scarica del calore. 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. Infine, alle attività di analisi e monitoraggio sperimentale saranno affiancate attività modellistiche finalizzate sia allo studio delle cinetiche di adsorbimento/desorbimento sia all'analisi dei profili termici che si instaurano all'interno del serbatoio in diverse condizioni operative. Tematica "ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili" - Con riferimento alla linea di ricerca sui sistemi di accumulo termico, di tipo termocline, ibridizzati alimentabili da CSP e da altre tecnologie energetiche rinnovabili, per la produzione di calore per processi industriali, verrà realizzato un prototipo di serbatoio di accumulo contenente una miscela di sali ternari come mezzo di stoccaggio termico. All'interno del serbatoio verranno installati tre differenti scambiatori di calore, due per la carica del sistema ed uno per la successiva fase di scarica del calore accumulato. In questo modo si prevede di caricare il sistema di accumulo sia con l'energia proveniente dal campo solare già presente in Casaccia (impianto ENEA-SHIP) e sia con l'energia proveniente da un'altra tecnologia rinnovabile come ad esempio il fotovoltaico. Attraverso lo scambiatore di scarica è poi possibile analizzare la fornitura di calore ad un processo industriale o la fornitura di energia elettrica. Per la linea di ricerca sui sistemi innovativi di riscaldamento elettrico dei sali fusi per l'ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili, le opzioni per il riscaldamento elettrico dei sali fusi sono l'effetto Joule, l'induzione elettromagnetica e le microonde. Ad oggi è stato considerato l'opzione dell'effetto Joule attraverso resistenze elettriche di tipo convenzionale immerse nei sali fusi, mentre il riscaldamento ad induzione e a microonde sono le opzioni più innovative in questo ambito applicativo, sebbene siano tecnologie mature in altri settori (metallurgia, industria alimentare). Si analizzerà la trasferibilità delle due soluzioni più innovative (microonde e induzione) e di sistemi alternativi basati sull'effetto Joule ai sistemi di accumulo a sali fusi, investigando la profondità della penetrazione della radiazione elettromagnetica e la risposta del materiale. La sfida tecnica risiede nel trasferire il calore dal dispositivo di conversione elettrico-termica alla massa dei sali attraverso meccanismi volumici e non di superficie. La linea di ricerca si articolerà in 3 fasi: (1) confronto tra le opzioni con modelli fisici, (2) scelta dell'opzione più promettente e progettazione di un dispositivo sperimentale/prototipo, (3) test del dispositivo sperimentale/prototipo e simulazione numerica di un sistema full-scale. Per la linea sulla simulazione e ottimizzazione di impianti ibridi CSP/PV/Eolici di scala medio-piccola operanti sui mercati MGP e MSD, l'analisi partirà da quanto sviluppato nel precedente PTR, ma estenderà l'analisi precedentemente svolta a impianti ibridizzati anche con tecnologia eolica e richiederà lo sviluppo di metodologie di ottimizzazione rigorose sia del design che dell'operation per poter operare sia sui mercati MGP che MSD tenendo conto di diversi scenari di prezzo. Non si prevedono criticità legate all'implementazione delle metodologie di ottimizzazione proposte perché già testate in scenari più semplici nel precedente PTR. Lo studio proposto permetterà la valutazione accurata di soluzioni ibride CSP/PV/Eolico in grado di ridurre ulteriormente il costo dell'elettricità ed allo stesso tempo aumentarne la dispacciabilità. Ulteriore beneficio dello studio proposto riguarda la possibilità di verificare la capacità degli impianti ibridi di contribuire ai servizi ancillari di bilanciamento della rete elettrica nazionale. Infine, i risultati consentiranno di valutare i principali indicatori economici (net present value, internal rate of return, pay back time) utili a potenziali privati interessati ad investire nel settore del CSP ibrido.

Tematica "soluzioni tecniche e procedure operative per il settore industriale del CSP" - Con riferimento alla linea di ricerca sulle tecnologie ad ultrasuoni per sistemi di rilevazione di occlusioni solide all'interno del piping di impianti CSP utilizzando miscele di sali fusi come fluido termovettore, l'impiego della tecnologia agli ultrasuoni, basata sull'invio di impulsi ultrasonori e sulla ricezione dei segnali riflessi dalle discontinuità presenti nel fluido termovettore in seguito all'innescò del fenomeno della solidificazione della miscela di sali fusi, si presenta, dal punto di vista teorico, come una tecnologia promettente e dalle notevoli potenzialità per l'applicazione in oggetto. Per la linea di ricerca sulle procedure operative per impianti CSP con fluido termovettore costituito da miscele di sali fusi bassofondenti e studio della compatibilità dei materiali a contatto con le miscele in condizioni reali di funzionamento, verranno fatte circolare le due miscele di sali all'interno del circuito MoSE, sito presso il C.R. ENEA di Casaccia, nei rispettivi range di temperatura (miscela ternaria tra

200 °C e 400 °C, miscela quaternaria tra 400 °C e 600 °C) studiando il loro comportamento nelle reali condizioni di funzionamento, in particolare nelle operazioni di primo avvio del circuito, riempimento e drenaggio. Sulla base delle attività sperimentali verranno ottimizzate le procedure operative per la gestione degli impianti CSP per le fasi analizzate. Verranno inoltre effettuate delle prove di compatibilità tra le miscele di sali circolanti all'interno del circuito sperimentale MoSE ed alcuni tipi di acciai puri e saldati al fine di ampliare il ventaglio dei materiali idonei alla realizzazione di impianti CSP.

In considerazione della complessità e innovatività del Progetto e del numero elevato di partner e di linee di attività, con la finalità di sviluppare le ricerche in costante sinergia tra l'affidatario ENEA e le Università co-beneficiarie per tutta la durata del Progetto, il presente capitolato tecnico di Progetto 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 2022-2024 della Ricerca di Sistema elettrico nazionale.

Il presente documento riporta:

- struttura del Progetto e descrizione sintetica delle attività di ricerca in carico all'affidatario e ai singoli co-beneficiari, unitamente a un'analisi che evidenzia (se esistenti) o esclude sovrapposizioni e/o collegamenti di attività tra affidatario e co-beneficiari;
- composizione del Comitato di Coordinamento;
- proposta di coordinamento, ai fini dell'esecuzione del Progetto;
- calendario/tempistica delle azioni di coordinamento.

### 2. STRUTTURA E ATTIVITÀ DI RICERCA DEL PROGETTO

Gli obiettivi generali del Progetto 1.9 "Solare termodinamico" e gli obiettivi specifici delle diverse linee di ricerca sono riportati nel capitolato tecnico di Progetto.

Al fine di evidenziare l'esclusione di sovrapposizioni di attività tra affidatario e co-beneficiari e la presenza, invece, di collegamenti tra attività di ricerca che risultano complementari e sinergiche, si riportano di seguito la struttura e le attività del Progetto 1.9 esplicitando "chi fa cosa" ovvero a chi sono in carico (ENEA, Università) le diverse linee di attività.

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) fra di loro interconnesse e in carico all'affidatario ENEA e/o alle Università co-beneficiarie.

1. La prima tematica scientifico-applicativa è inerente a "materiali e componenti avanzati per impianti CSP" e prevede 4 linee di ricerca.

- Nell'ambito della linea di ricerca sui "coating innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti CSP a collettori lineari" [LA1.1 e LA1.2, in carico a ENEA, e LA1.3, in carico a UniPA], ENEA svilupperà materiali base e processi di deposizione per coating innovativi per tubi ricevitori evacuati [LA1.1] e realizzerà, in forma di prototipo, (i) un coating a elevate prestazioni fototermiche per tubi ricevitori di impianti micro-PTC operanti a media T ( $\leq 350$  °C) e (ii) un coating a prestazioni fototermiche incrementate rispetto allo stato dell'arte per tubi ricevitori di impianti CSP a collettori lineari (PTC o LFC) operanti ad alta T ( $\leq 550$  °C) [LA1.2]. Lo studio morfologico, strutturale e composizionale svolto da UniPA [LA1.3] sui materiali base e sulle strutture multistrato sviluppati da ENEA, sarà di supporto per verificare la stabilità di entrambi i coating innovativi realizzati da ENEA, per una vita utile di almeno 25 anni nelle condizioni operative previste dalle applicazioni di destinazione.

- Nell'ambito della linea di ricerca sulla "tecnologia micro-CSP basata su sistemi di tipo micro-PTC per la generazione distribuita di energia in contesti civili e industriali" [LA 1.4 e LA1.6, in carico a UniFI e LA1.5, in carico a ENEA], UniFI effettuerà un'analisi del potenziale applicativo di tale tecnologia per la generazione distribuita di calore, elettricità ed energia frigorifera in contesti, civili e industriali, fortemente antropizzati del territorio italiano [LA1.4]. Il prototipo di un innovativo sistema modulare micro-PTC, sviluppato e realizzato da UniFI in attività di ricerca precedenti a quelle di Progetto, sarà caratterizzato da ENEA mediante prove di laboratorio e in campo, per individuarne criticità e possibili soluzioni migliorative [LA1.5] che saranno alla base di uno studio progettuale di up-grade del micro-PTC, condotto da UniFI e finalizzato a incrementare la T operativa del sistema fino a 350 °C (per impiego cogenerativo) e facilitarne l'integrazione in strutture edilizie e l'industrializzazione [LA1.6].

- Nell'ambito della linea di ricerca sulle "superfici riflettenti autopulenti con sensoristica integrata per impianti CSP" [LA1.7, LA1.8 e LA1.9, in carico a ENEA], al fine di razionalizzare gli interventi di pulizia e ridurre i costi O&M del campo solare, ENEA ottimizzerà metodi di fabbricazione (economici e scalabili) di rivestimenti autopulenti su specchi solari di dimensioni reali [LA1.7], realizzerà e caratterizzerà in campo un prototipo di superficie riflettente autopulente [LA1.8] e svilupperà un prototipo di sensore di sporco/failure per la diagnosi in remoto dell'operatività del campo solare [LA1.9].



- Nell'ambito della linea di ricerca sui "sistemi di accumulo termo-chimico a zeoliti per applicazioni distribuite a media temperatura del CSP" [LA1.10, in carico a ENEA], ENEA condurrà una sperimentazione in campo (mediante facility di test appositamente implementate) di innovativi sistemi di accumulo termo-chimico a zeoliti con l'obiettivo di valutare il potenziale di tali sistemi per applicazioni termiche distribuite di piccola taglia a  $T < 250\text{ °C}$  [LA1.10].

2. La seconda tematica scientifico-applicativa è inerente all'"ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili" e prevede 3 linee di ricerca.

- Nell'ambito della linea di ricerca sui "sistemi di accumulo termico, di tipo termoclino, ibridizzati alimentabili da CSP e da altre tecnologie energetiche rinnovabili, per la produzione di calore per processi industriali" [LA1.11 e LA1.13, in carico a ENEA, LA1.12 e LA1.14, in carico a PoliTO], ENEA progetterà [LA1.11] e realizzerà [LA1.13] un prototipo di sistema di accumulo termoclino dotato di scambiatori elicoidali immersi nei sali fusi (2 di carica e 1 di scarica) ibridizzato, alimentabile da un campo solare CSP e da una caldaia elettrica collegata a un impianto PV. La sperimentazione condotta da ENEA sull'impianto Fresnel "ENEASHIP" con asservito il prototipo del sistema di accumulo ibridizzato [LA1.13], supportata da simulazione del prototipo del sistema termoclino mediante un modello numerico sviluppato ad hoc da PoliTO [LA1.12], consentirà di valutare le prestazioni termiche del prototipo e definire procedure operative di gestione dell'impianto CSP ibridizzato ottimizzate per la produzione di calore per processi industriali. Infine, PoliTO effettuerà un confronto, mediante analisi numerica, delle prestazioni del prototipo con quelle di un ulteriore innovativo sistema di accumulo termoclino ibridizzato dotato di resistenze elettriche immerse nei sali fusi in luogo di uno dei due scambiatori di carica [LA1.14].

- Nell'ambito della linea di ricerca sui "sistemi innovativi di riscaldamento elettrico dei sali fusi per l'ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili" [LA1.15 e LA1.17, in carico a ENEA, LA1.16 e LA1.18, in carico a PoliTO], ENEA condurrà un'analisi su sistemi di riscaldamento elettrico a induzione e/o a micro-onde, alimentabili da PV, potenzialmente più efficienti rispetto al riscaldamento Joule con resistenze elettriche convenzionali immerse nei sali fusi [LA1.15]. Anche con il supporto dell'analisi numerica condotta da PoliTO mediante un modello numerico sviluppato ad hoc [LA1.16], ENEA progetterà e realizzerà un dispositivo sperimentale, su scala di laboratorio, che sarà impiegato per la caratterizzazione delle prestazioni termiche del concept proposto basato sulla tecnologia di riscaldamento più promettente [LA1.17]. Il potenziale applicativo della nuova tecnologia di riscaldamento elettrico dei sali fusi sarà valutato da PoliTO implementando tale tecnologia, mediante simulazione numerica, in sistemi di accumulo termico ad alta T (fino  $550\text{ °C}$ ) di dimensioni reali alimentabili da calore e da elettricità prodotti, rispettivamente, da CSP e PV [LA1.18].

- Nell'ambito della linea di ricerca sulla "simulazione e ottimizzazione di impianti ibridi CSP/PV/Eolici di scala medio-piccola operanti sui mercati MGP e MSD" [LA1.19, in carico a PoliMI], PoliMI svilupperà modelli numerici e una metodologia innovativa per l'ottimizzazione di design e operation di impianti ibridizzati tra CSP, PV ed Eolico, per procedere all'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) [LA1.19].

3. La terza tematica scientifico-applicativa è inerente a "soluzioni tecniche e procedure operative per il settore industriale del CSP" e prevede 2 linee di ricerca.

- Nell'ambito della linea di ricerca sulle "tecnologie ad ultrasuoni per sistemi di rilevazione di occlusioni solide all'interno del piping di impianti CSP utilizzando miscele di sali fusi come fluido termovettore" [LA1.20, in carico a UniNA], mediante analisi teoriche e simulazioni numeriche, UniNA valuterà le criticità connesse all'impiego delle tecnologie ad ultrasuoni per l'applicazione in oggetto e renderà disponibile la configurazione preliminare e la valutazione di massima del costo di un dispositivo di diagnosi ad ultrasuoni [LA1.20].

- Nell'ambito della linea di ricerca sulle "procedure operative per impianti CSP con fluido termovettore costituito da miscele di sali fusi bassofondenti e studio della compatibilità dei materiali a contatto con le miscele in condizioni reali di funzionamento" [LA1.21 e LA 1.23, in carico a ENEA, LA1.22 e LA1.24, in carico a UniRM2], ENEA selezionerà due miscele di sali fusi bassofondenti per applicazioni a media T ( $200\text{--}400\text{ °C}$ ) e ad alta T ( $400\text{--}600\text{ °C}$ ), una lista di acciai potenzialmente compatibili con le due miscele e apporterà le opportune modifiche al circuito sperimentale "MoSE" (Molten Salt Experiments) [LA1.21] per renderlo idoneo alle attività previste nel Progetto. A questo riguardo, la campagna sperimentale condotta da ENEA sul circuito "MoSE", caricato con le due miscele di sali fusi bassofondenti a contatto con provini degli acciai selezionati, consentirà di mettere a punto le procedure per la gestione operativa, ordinaria e di emergenza, degli impianti CSP a sali fusi di scala commerciale [LA1.23]. Inoltre, sulla base dei risultati delle analisi metallografiche (SEM/EDS/XRD) e dell'applicazione di modelli cinetici del meccanismo di corrosione da parte di UniRM2 [LA1.22 e LA1.24] sui provini di acciaio (sia tal quali che sottoposti ai test di corrosione dinamica nel "MoSE" in condizioni simili a quelle reali di esercizio), ENEA individuerà gli acciai idonei per l'utilizzo, in ambito industriale, in qualità di materiali da costruzione per la realizzazione di componenti e/o sottosistemi di impianti CSP a sali fusi bassofondenti [LA1.23].

Infine, per massimizzare l'impatto del Progetto, ENEA curerà con particolare attenzione le attività di "Comunicazione e disseminazione dei risultati" del Progetto (LA1.25 e LA1.26).

Dall'analisi della descrizione sintetica, sopra riportata, 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 1.9, le diverse e specifiche conoscenze, competenze, esperienze pregresse 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 ("coating

innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti CSP a collettori lineari”, “tecnologia micro-CSP basata su sistemi di tipo micro-PTC per la generazione distribuita di energia in contesti civili e industriali”, “sistemi di accumulo termico, di tipo termoclino, ibridizzati alimentabili da CSP e da altre tecnologie energetiche rinnovabili, per la produzione di calore per processi industriali”, “sistemi innovativi di riscaldamento elettrico dei sali fusi per l’ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili” e “procedure operative per impianti CSP con fluido termovettore costituito da miscele di sali fusi bassofondenti e studio della compatibilità dei materiali a contatto con le miscele in condizioni reali di funzionamento”) 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 1.9 e nell’ottica dell’applicazione pratica, in una prospettiva di medio periodo, dei risultati/prodotti della ricerca.

A titolo di esempio: sfruttando l’effetto sinergico delle ricerche sviluppate da ENEA, UniPA, UniFI e UniRM2 nell’ambito del Progetto, si vogliono possibilmente rendere disponibili, in una prospettiva di medio periodo, soluzioni tecnologiche avanzate costituite da innovativi sistemi micro-PTC, dotati di tubi ricevitori con il nuovo coating per media T (altamente performante e stabile), superfici riflettenti sensorizzate provviste di economici rivestimenti autopulenti, abbinati a compatti sistemi di accumulo a zeoliti per la produzione distribuita 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 termoclino a sali fusi bassofondenti (che prevedano l’impiego di acciai compatibili con detti sali per la costruzione di parti del sistema di stoccaggio) per la cogenerazione distribuita di elettricità (con cicli ORC a 350 °C) e di calore a media T per utenze industriali e civili.

Sempre a titolo di esempio: sfruttando l’effetto sinergico delle ricerche sviluppate da ENEA, UniPA, PoliTO, PoliMI, UniNA e UniRM2, si vogliono possibilmente rendere disponibili, in una prospettiva di medio periodo, soluzioni tecnologiche avanzate per impianti CSP (PTC e LFC) di grande taglia, 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 bassofondenti, dotati di tubi ricevitori con il nuovo coating per alta T (con prestazioni che costituiranno il nuovo stato dell’arte della tecnica), specchi autopulenti e sensorizzati, sistemi di rilevazione a ultrasuoni per la diagnosi in remoto dell’incipiente solidificazione dei sali fusi nel piping dell’impianto, materiali/parti/componenti/subsistemi dell’impianto costruiti in acciai compatibili con detti sali bassofondenti e con gestione ottimizzata dei sali fusi mediante procedure sviluppate ad hoc nel Progetto. Tali impianti CSP “di potenza” potrebbero essere ibridizzati con altre tecnologie FER “elettriche”, PV e/o eolico in primis, mediante integrazione a livello di sistema di accumulo termico dotato di soluzioni innovative di riscaldamento elettrico dei sali fusi, e con design/operation ottimizzati al fine di minimizzare il costo dell’elettricità prodotta e aumentarne la dispacciabilità.

### 3. 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 stato costituito un Comitato di Coordinamento (di seguito CdC) composto dal capoprogetto, dai referenti delle linee di ricerca (di cui al precedente paragrafo), dai referenti dell’affidatario e dei co-beneficiari:

1. Ing. Antonio Guglielmo (ENEA), capoprogetto e referente per le attività di “Comunicazione e disseminazione dei risultati”;
2. Ing. Salvatore Esposito (ENEA), referente della linea di ricerca “Coating innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti CSP a collettori lineari”;
3. Prof. Maurizio De Lucia (UniFI), referente della linea di ricerca “Tecnologia micro-CSP basata su sistemi di tipo micro-PTC per la generazione distribuita di energia in contesti civili e industriali” e referente del co-beneficiario “Università degli Studi di Firenze”;
4. Dott.ssa Anna Castaldo (ENEA), referente della linea di ricerca “Superfici riflettenti autopulenti con sensoristica integrata per impianti CSP”;
5. Dott. Vincenzo Sabatelli (ENEA), referente della linea di ricerca “Sistemi di accumulo termo-chimico a zeoliti per applicazioni distribuite a media temperatura del CSP”;
6. Ing. Valeria Russo (ENEA), referente delle linee di ricerca “Sistemi di accumulo termico, di tipo termoclino, ibridizzati alimentabili da CSP e da altre tecnologie energetiche rinnovabili, per la produzione di calore per processi industriali” e “Procedure operative per impianti CSP con fluido termovettore costituito da miscele di sali fusi bassofondenti e studio della compatibilità dei materiali a contatto con le miscele”;
7. Ing. Michela Lanchi (ENEA), referente della linea di ricerca “Sistemi innovativi di riscaldamento elettrico dei sali fusi per l’ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili”;
8. Prof. Marco Binotti (PoliMI), referente della linea di ricerca “Simulazione e ottimizzazione di impianti ibridi CSP/PV/Eolici di scala medio-piccola operanti sui mercati MGP e MSD” e referente per il co-beneficiario “Politecnico di Milano”;
9. Prof. Rosario Aniello Romano (UniNA), referente della linea di ricerca “Tecnologie ad ultrasuoni per sistemi di rilevazione di occlusioni solide all’interno del piping di impianti CSP utilizzando miscele di sali fusi come fluido termovettore” e referente del co-beneficiario “Università degli Studi di Napoli Federico II”;

10. Ing. Walter Gaggioli (ENEA), referente dell'affidatario "Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile";
11. Prof. Roberto Zanino (PoliTO), referente del co-beneficiario "Politecnico di Torino";
12. Prof. Alessandro Galia (UniPA), referente del co-beneficiario "Università degli Studi di Palermo";
13. Prof.ssa Silvia Licocchia, (UniRM2), referente del co-beneficiario "Università degli Studi di Roma Tor Vergata".

#### 4. PROPOSTA DI COORDINAMENTO

La pregressa esperienza maturata dall'affidatario e dai co-beneficiari, con riferimento ai risultati precedentemente ottenuti nell'ambito del PTR 2019-2021 e/o a quelli conseguiti nell'ambito 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 nell'ambito del PTR 2022-2024.

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 2022-2024) 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 si propone di realizzare un efficace coordinamento, in fase di esecuzione del Progetto, 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, con la finalità ultima di raggiungere, in modo efficiente e con pieno successo, gli obiettivi generali del Progetto 1.9 "Solare termodinamico", nonché gli obiettivi specifici di ogni linea di ricerca di Progetto, in accordo con la tempistica definita dal cronoprogramma. All'inizio del Progetto 1.9, si prevede un incontro preliminare 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 il triennio 2022-2024, l'assenza di eventuali sovrapposizioni di ricerca non preventivate in fase di stesura della proposta di Progetto, 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 potenziare il raggiungimento degli obiettivi generali 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 tecnico di Progetto) o, a maggior ragione, nel caso d'insorgenza di rischi non preventivabili e 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/attuato, sfruttando le diverse, variegata e ampie conoscenze, competenze, esperienze in capo a ENEA e alle Università co-beneficarie.

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 gli ENEA e Università co-beneficarie, l'opportunità di definire altre azioni congiunte sarà definita 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 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 sviluppino le diverse attività di ricerca del Progetto 1.9.

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:

- monitoraggio continuo dell'attuazione del "piano di lavoro" del Progetto (di cui al punto "3.1 Descrizione del piano di lavoro" del capitolato tecnico di Progetto) e, in particolare, controllo dello stato di avanzamento delle linee di ricerca (e, se del caso, delle LA in cui queste si sviluppino);
- 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.

#### 5. 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: M0 - 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

- Valutazione avanzamento attività di ricerca

- Condivisione dei risultati della ricerca

- Valutazione e attuazione azioni di coordinamento

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

Oggetto della riunione:

- Condivisione dei risultati intermedi della ricerca, estesa ai ricercatori coinvolti nel Progetto

- Presentazione di attività/risultati/prodotti da parte dei referenti delle linee di ricerca e/o di loro delegati

- Valutazione avanzamento attività di ricerca

- Valutazione e attuazione azioni di coordinamento

- Perfezionamento azioni in essere per emissione SAL intermedio di Progetto

Data: M24 - Tipo: Riunione CdC

Oggetto della riunione:

- Valutazione avanzamento attività di ricerca

- Condivisione dei risultati della ricerca

- Valutazione e attuazione azioni di coordinamento

Data: M30 - Tipo: Riunione CdC

Oggetto della riunione:

- Valutazione avanzamento attività di ricerca

- Condivisione dei risultati della ricerca

- Valutazione e attuazione azioni di coordinamento

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

Oggetto della riunione:

- Condivisione dei risultati finali della ricerca (con particolare riferimento al raggiungimento degli obiettivi specifici delle linee di ricerca e degli obiettivi generali del Progetto), estesa ai ricercatori coinvolti nel Progetto

- Presentazione di attività/risultati/prodotti da parte dei referenti delle linee di ricerca e/o di loro delegati

- Perfezionamento azioni in essere per emissione SAL finale di Progetto

Oltre alle 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, il conseguimento dei risultati e il rilascio dei prodotti della ricerca rispetto a quanto previsto dal capitolato tecnico di 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-beneficarie 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" nel triennio 2022-2024 sono coerenti e in continuità con quelle dell'analogo Progetto del precedente triennio 2019-2021. 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, 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 al precedente triennio, un maggior impegno rispetto agli obiettivi di decarbonizzazione del sistema energetico nazionale. In particolare, in ambito nazionale, gli obiettivi fissati per la decarbonizzazione prevedono una riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> che raggiunga il 55% nel 2030 (rispetto al 1990), coerentemente con il pacchetto di proposte "Fit for 55%" dalla Commissione Europea (CE), fino ad arrivare al 100% nel 2050. Il raggiungimento di questi obiettivi implica sia l'innovazione del sistema energetico, all'interno del quale la quota di elettrificazione deve divenire prevalente, sia la crescita ad almeno il 72% al 2030 del contributo delle energie rinnovabili alla generazione elettrica, coprendo quote prossime al 100% del mix energetico primario complessivo nel 2050. In ambito comunitario, a seguito del conflitto russo-ucraino, con la comunicazione del 08/03/2022 "REPowerEU: Joint European Action for more affordable, secure and sustainable energy", la CE traccia un percorso per ridurre la dipendenza dell'UE dal gas proveniente dalla Russia, rafforzando e accelerando le misure del pacchetto "Fit for 55%". Le linee guida della CE per la revisione del PNIEC (Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima) tengono conto delle indicazioni di RepowerEU. Il PNRR (Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza), infine, rappresenta un deciso impulso all'avvio di un processo di transizione energetica sostenibile e di decarbonizzazione in molteplici settori, con una dotazione di fondi di rilievo assoluto e riforme del quadro normativo e dei procedimenti autorizzativi finalizzati a un rapido incremento della penetrazione delle energie rinnovabili. In considerazione dello scenario di riferimento europeo e nazionale sopra descritto, nel Piano della Ricerca di Sistema elettrico nazionale per il triennio 2022-2024 viene dato forte rilievo, tra l'altro, a progetti inerenti allo sviluppo e applicazione delle fonti rinnovabili (tecnologie ad alta efficienza e azioni di sistema, sviluppo di materiali innovativi). In quest'ambito, particolare enfasi è data al potenziale impatto sul sistema energetico e ai benefici in termini di adeguatezza e sicurezza degli approvvigionamenti energetici nonché di spinta alla transizione del sistema energetico stesso, in uno scenario di medio-lungo termine, alle fonti di energia rinnovabili (FER), alle comunità dell'energia e alla decarbonizzazione dei settori industriali (inclusi gli "hard-to-abate"). Pertanto, la ricerca proposta nel triennio 2022-2024 è chiamata a produrre le innovazioni tecnologiche necessarie a sostenere la transizione energetica, con specifica focalizzazione su quelle in grado di favorire l'incremento della penetrazione nel sistema energetico delle tecnologie che producono energia da fonti rinnovabili. Tra le tecnologie FER, quella del solare termodinamico (o Concentrating Solar Power, CSP) è di particolare rilevanza per la sua peculiarità di poter immettere in rete energia rinnovabile (solare) in modo "programmabile". Tale caratteristica permette di superare alcune criticità riguardanti la gestione di un sistema energetico sempre più basato sulla generazione da fonti rinnovabili aleatorie quali il solare fotovoltaico (PV) e l'eolico. Un elemento chiave della tecnologia CSP consiste, infatti, nella possibilità di accumulare l'energia solare sotto forma di calore, in modo efficiente e con costi relativamente contenuti. La presenza di appositi sistemi di accumulo termico conferisce agli impianti CSP la caratteristica della dispacciabilità, ovvero la capacità di produrre energia elettrica in maniera temporalmente disaccoppiata dalla disponibilità della fonte primaria e quando è richiesta dal sistema elettrico. Grazie alla dispacciabilità, il solare termodinamico può rappresentare una soluzione complementare alle altre tecnologie di generazione di energia da fonti rinnovabili: l'integrazione tra impianti CSP, che permettono una generazione stabile e programmabile di energia elettrica anche in assenza della fonte solare, con altre tecnologie FER, PV ed eolico in primis, permetterà di massimizzare l'immissione di energia rinnovabile nella rete elettrica riducendo, al tempo stesso, le criticità dovute alle fluttuazioni della fonte primaria che hanno impatti significativi sulle attività di gestione della rete elettrica in termini di possibili disservizi, regolazione della tensione e adeguatezza del sistema. In quest'ambito, alcuni studi condotti da ENEA nel precedente PTR 2019-2021 hanno dimostrato come un'ottimale integrazione tra impianti CSP e PV permetterebbe di produrre elettricità da fonte solare in modo programmabile e a un costo ridotto rispetto a impianti CSP e PV non ibridizzati, fino a coprire anche il 70% di un carico variabile ottenuto riscaldando la tipica curva di domanda di elettricità, allineando la generazione con i tipici profili orari di carico su base nazionale. Tale risultato non sarebbe possibile producendo energia da solo CSP o da solo PV per la presenza, in entrambe le tecnologie, di componenti che allo stato attuale hanno un costo specifico ancora elevato (campo solare e power block per il CSP, sistemi di accumulo elettrico a batterie per il PV).

Con riferimento ai sistemi di accumulo termico che, come detto, sono alla base dei vantaggi peculiari della tecnologia CSP, il Progetto proposto prevede tutta una serie di innovazioni che possono tradursi, direttamente o indirettamente, in incremento della flessibilità

dell'accumulo con conseguenti benefici per il sistema energetico nazionale. Tale flessibilità è anche intesa come versatilità nell'alimentazione termica/elettrica dei sistemi di accumulo per favorire l'integrazione/ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili. A questo proposito nel Progetto saranno studiati sistemi di riscaldamento elettrico dei sali fusi, che sono impiegati come mezzo di conversione elettro-termica e come mezzo di accumulo termico; tali sistemi, anche di tipo termocline, basati sui sali fusi, ossia materiali non critici dal punto di vista della reperibilità e dell'impatto ambientale, a basso costo, a risposta veloce, realizzabili su maggiore scala rispetto alle batterie elettriche, potranno contribuire significativamente al raggiungimento degli obiettivi di decarbonizzazione previsti dal Green Deal. Lo sviluppo di sistemi di accumulo termo-chimico a zeoliti per la media temperatura, indirizzato principalmente ad applicazioni distribuite del CSP 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, potrà 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.

Nell'ottica di ampliare l'offerta di servizi ancillari erogabili al sistema elettrico e considerato il ruolo che la tecnologia CSP, tal quale ma soprattutto ibridizzata con altre tecnologie FER, può svolgere per garantire la dispacciabilità dell'energia prodotta e il bilanciamento del binomio produzione-domanda, saranno rilevanti i risultati della linea di ricerca sulla simulazione e ottimizzazione di impianti ibridi CSP/PV/Eolici di scala medio-piccola operanti sui mercati MGP e MSD.

Affinché la tecnologia CSP possa contribuire efficacemente al processo di decarbonizzazione, realizzabile mediante l'elettrificazione dei consumi di energia e la transizione energetica dalle fonti fossili a quelle rinnovabili, il Progetto si pone come obiettivo la riduzione prospettica del costo di generazione dell'energia (in primis elettrica, ma anche termica) da CSP, sviluppando e sperimentando e/o applicando, in prototipi dimostrativi, materiali, componenti, sistemi, soluzioni tecniche e metodologie avanzate studiati in laboratorio o sviluppati a livello concettuale (sia nel precedente triennio che nelle prime fasi del Progetto proposto per il nuovo triennio). La finalità è incrementare le prestazioni e ridurre le spese operative e di manutenzione degli impianti CSP tal quali ovvero ibridizzati con altre tecnologie energetiche rinnovabili. In quest'ambito, la disponibilità a fine Progetto di coating innovativi, a elevate prestazioni fototermiche e alta stabilità, specificamente sviluppati per tubi ricevitori di sistemi micro-PTC a media temperatura, concorrerà a dimostrare l'efficacia e quindi la fattibilità di impianti micro-CSP per la generazione distribuita di energia con impatto ambientale minimo rispetto a quello provocato dalle fonti energetiche da combustibili fossili. Inoltre, la disponibilità di coating innovativi dalle prestazioni fototermiche migliorate, specificamente sviluppati per tubi ricevitori solari evacuati operanti ad alta temperatura, consentirà di diminuire il costo dell'energia producibile mediante la tecnologia degli impianti solari CSP a collettori lineari di grande taglia, con conseguente riduzione del gap concorrenziale nei confronti delle altre tecnologie rinnovabili con cui la tecnologia CSP potrà, in ogni caso, essere vantaggiosamente ibridizzata. Tra l'altro, per quanto riguarda i potenziali vantaggi per il sistema elettrico nazionale legati allo sviluppo di tecnologie CSP con efficienze maggiori delle attuali, la possibilità di realizzare impianti CSP in grado di generare potenza maggiore a parità di superficie occupata, ovvero con minore occupazione di suolo a parità di potenza installata, può avere un indubbio vantaggio per un Paese come l'Italia, caratterizzato da un elevato numero di siti protetti dal punto di vista architettonico e/o paesaggistico e, in generale, con limitata disponibilità di territorio utile per la costruzioni di campi solari. Sempre in merito allo sviluppo di materiali e componenti avanzati, la disponibilità di innovativi rivestimenti autopulenti per superfici riflettenti determinerà un impatto considerevole in termini di riduzione dei costi delle operazioni di ordinaria manutenzione del campo solare (riduzione del consumo di acqua per singolo lavaggio e della frequenza dei cicli di pulizia) e, quindi, del costo dell'energia prodotta mediante tecnologia CSP; inoltre, il risparmio di acqua (specie in aree a bassa piovosità del territorio nazionale oppure in aree desertiche di taluni territori UE e, soprattutto, extra UE) potrà avere una ricaduta considerevole in termini di salvaguardia ambientale.

I risultati del Progetto potranno contribuire alla capillare transizione energetica e decarbonizzazione di settori industriali energivori, attualmente serviti da tecnologie energetiche convenzionali utilizzanti combustibili fossili, attraverso la co-fornitura di calore a media e alta temperatura, oltre che di elettricità, in soluzioni sia centralizzate che distribuite. Il Progetto si propone, quindi, di supportare la diffusione delle tecnologie solari a concentrazione CSP nel sistema energetico nazionale in modo da favorire lo sviluppo e la costruzione di impianti per la cogenerazione distribuita di elettricità/calore, ovvero per la trigenerazione distribuita di elettricità/calore/energia frigorifera, in contesti civili o anche integrati con processi industriali e sistemi energetici convenzionali di piccola-media taglia già esistenti. In quest'ambito, si inserisce la linea di ricerca di Progetto in cui si caratterizzerà un innovativo sistema micro-CSP con collettore di tipo micro-PTC (peraltro, facilmente integrabile in edifici civili e industriali) per effettuare, sulla base di dati sperimentali, uno studio progettuale di up-grade atto a migliorarne le prestazioni, ridurre i costi di fabbricazione ed estenderne il campo applicativo alla generazione di calore di processo a media temperatura e di energia elettrica con cicli ORC. Inoltre, con specifico riferimento alle tecnologie SHIP (Solar Heat Industrial Processes), ulteriori benefici, anche in termini di riduzione delle emissioni inquinanti, potranno essere ottenuti dalle attività sperimentali condotte sull'impianto solare ENEA-SHIP del C.R. ENEA di Casaccia, in grado di simulare in scala reale un impianto CSP che alimenta utenze termiche industriali di diversa natura.

Infine, si evidenzia che lo sviluppo di soluzioni tecniche per la diagnosi in remoto del piping di impianti CSP a sali fusi e di procedure per la gestione operativa di nuove miscele di sali fusi bassofondenti potrà contribuire direttamente al conseguimento di benefici ambientali per il sistema energetico. Infatti, tali linee di ricerca (previste dal Progetto su input provenienti dal settore industriale del CSP) supportano e promuovono la diffusione di tecnologie CSP 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 di tipo ambientale nei

siti presso cui verranno realizzati gli impianti CSP.

### **b) Benefici per gli utenti**

I benefici attesi per gli utenti sono legati, in generale, alla disponibilità di una tecnologia CSP con componenti avanzati e soluzioni tecniche/procedurali innovative per impianti di generazione di energia (in primis elettrica, ma anche termica) più performanti, 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. In particolare, le linee di ricerca proposte nel Progetto 1.9 "Solare termodinamico" inerenti allo sviluppo di materiali e componenti avanzati più efficienti, affidabili e in grado di semplificare la gestione operativa degli impianti CSP puntano, sinergicamente, al miglioramento delle performance e al contenimento e delle spese operative e di manutenzione degli impianti CSP. In quest'ambito, la disponibilità d'innovativi coating a elevate prestazioni per tubi ricevitori di sistemi di tipo micro-PTC offrirà l'evidente vantaggio di poter produrre energia (elettrica e termica) da fonte rinnovabile, con alta efficienza, anche in contesti fortemente antropizzati caratterizzati dalla scarsa disponibilità di spazi. La disponibilità di coating innovativi per tubi ricevitori di impianti CSP a collettori lineari di grande taglia incrementerà la producibilità energetica annua di tali impianti, contribuendo alla riduzione del costo dell'energia elettrica prodotta da fonte rinnovabile. Inoltre, le soluzioni tecnologiche per specchi autopulenti con sensoristica integrata, che si intendono sviluppare, comporteranno evidenti vantaggi per gli utenti, sia in termini di riduzione del costo dell'energia elettrica prodotta da CSP che di minore impatto ambientale (minor impiego di acqua per il lavaggio del campo solare). La disponibilità di componenti e sistemi innovativi per impianti CSP di taglia piccola (possibilmente integrabili in edifici civili e, soprattutto, industriali) e media, da impiegarsi per la generazione distribuita di energia elettrica o, ancora meglio, per la cogenerazione distribuita di elettricità/calore ovvero per la trigenerazione distribuita di elettricità/calore/energia frigorifera, 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, si attendono benefici derivanti dall'applicazione dei risultati del Progetto inerenti (i) allo studio di up-grade di un innovativo sistema micro-CSP con collettore di tipo micro-PTC, finalizzato al suo impiego per la cogenerazione distribuita di calore di processo a media temperatura e di energia elettrica con ciclo ORC, e (ii) allo sviluppo di innovativi sistemi di accumulo termo-chimico a zeoliti, che si presentano particolarmente efficaci 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.

Mediante l'ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche da fonti rinnovabili e, in particolare, mediante l'applicazione di innovativi sistemi di accumulo termico "alimentati" da CSP e da elettricità generata da fotovoltaico e/o da eolico, 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. Inoltre, sempre nell'ambito dell'ibridizzazione del CSP con altre tecnologie FER, sono attesi benefici prospettici dai risultati della linea di ricerca, appositamente inserita nel Progetto, simulazione e ottimizzazione di impianti ibridi CSP/PV/Eolici di scala medio-piccola operanti sui mercati MGP e MSD.

Infine, si evidenzia che si attendono benefici per gli utenti del sistema energetico dallo sviluppo di soluzioni tecniche per la diagnosi in remoto del piping di impianti CSP a sali fusi e di procedure per la gestione operativa di nuove miscele di sali fusi bassofondenti. Infatti, tali linee di ricerca (previste dal Progetto su input provenienti dal settore industriale del CSP) puntano alla ottimizzazione delle strategie di gestione degli impianti CSP al fine di prevedere e limitare possibili problemi e fermi impianto causati dalla formazione nel piping di occlusioni costituite da sali solidificati e, nel contempo, analizzano la possibilità di utilizzo di differenti miscele di sali bassofondenti.

### **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" si prevede di massimizzare l'impatto e i benefici sul sistema Paese diffondendo non solo i risultati concreti delle attività di ricerca (quali materiali, prodotti e tecnologie innovative e/o migliorative rispetto allo stato dell'arte della tecnica, analisi, modelli o metodologie), 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 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 dei sistemi CSP (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, 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 proponenti del 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 comunicazione e 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 comunicazione e disseminazione, principalmente finalizzata al 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 nazionali ed internazionali di settore e grazie ad almeno due eventi di disseminazione, di cui uno conclusivo a fine Progetto, appositamente organizzati e primariamente rivolti agli stakeholder nazionali e ai 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 e, infine, saranno individuate possibili future azioni di ricerca nel settore di riferimento.

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 (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, sia tal quali che ibridizzati con altre tecnologie energetiche da fonti rinnovabili (in primis fotovoltaico, ma anche eolico). In quest'ambito, i risultati attesi dallo sviluppo di innovativi coating per tubi ricevitori di impianti CSP a collettori lineari di grande taglia e di coating per tubi ricevitori di impianti micro-CSP a collettori di tipo micro-PTC, potranno trovare ricadute applicative, anche di breve-medio periodo, nella produzione industriale di componentistica avanzata, con evidenti benefici economici-finanziari per i proponenti del Progetto. Con specifico riferimento allo sviluppo della tecnologia micro-CSP per la generazione distribuita di energia elettrica o, ancora meglio, per la cogenerazione distribuita di elettricità/calore ovvero per la trigenerazione distribuita di elettricità/calore/energia frigorifera, l'innovativo sistema micro-PTC che si vuole testare nell'ambito del Progetto e di cui si vuole estendere il campo applicativo, migliorandone al contempo le performance e l'affidabilità e riducendone i costi, si presenta come di sicuro interesse per l'industria manifatturiera di componentistica per impianti FER. Anche per la linea di ricerca sulle superfici riflettenti autopulenti con sensoristica integrata si prevedono ricadute applicative e/o possibile industrializzazione dei risultati del Progetto, sia nello specifico del componente specchio solare per impianti CSP che nella traslabilità dei rivestimenti autopulenti 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; peraltro, la possibilità di fabbricare, attraverso tecniche scalabili, sensori piezoelettrici di sporco è di sicuro interesse anche per molteplici altri settori (impianti fotovoltaici, monitoraggio ambientale delle polveri sottili disperse nell'atmosfera, controllo di livello di polveri, granulati e fluidi in contesti industriali, ecc.). Anche gli innovativi sistemi di accumulo termico che si intende sviluppare nell'ambito del Progetto possono contare su un mercato in forte crescita sia a livello nazionale che internazionale, in buona parte legato alla possibilità di recuperare e riutilizzare anche il calore di scarto di processi industriali, oltre che quello legato allo sfruttamento delle energie rinnovabili da fonte primaria non programmabile. Inoltre, i sistemi di accumulo termico si configurano come un elemento chiave per l'integrazione funzionale tra CSP e fotovoltaico e/o eolico, al fine di ottenere un impianto di generazione dispacciabile di energia da fonti rinnovabili. In particolare, con riferimento allo sviluppo di sistemi di accumulo termo-chimico a zeoliti per applicazioni distribuite a media temperatura del CSP, questi 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 utilizzano calore a media temperatura (cartiere, lavanderie industriali, caseifici, industrie agroalimentari, ecc.) con notevoli risparmi nel lungo periodo che aumenterebbero con l'aumentare del costo dei combustibili fossili. Lo sviluppo di sistemi di accumulo termico a sali fusi, di tipo termocline, ibridizzati in quanto alimentabili da CSP e da altre tecnologie energetiche rinnovabili, potranno migliorare la fornitura sia di energia elettrica che quella di calore per processi industriali in virtù della loro caratteristica di essere alimentati da più fonti rinnovabili, incrementando in questo modo la frazione di energia/calore prodotto esclusivamente da rinnovabili e stabilizzando la rete elettrica. Sempre con riferimento alle prospettive di



applicazione dei risultati della ricerca sui sistemi di accumulo a sali fusi e a nuove soluzioni tecniche per l'ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili, specificamente di tipo elettrico (PV, eolico), l'attività di ricerca su sistemi innovativi di riscaldamento elettrico dei sali fusi supporterà lo sviluppo di conoscenze multidisciplinari e interdisciplinari nel settore dei materiali, dell'ingegneria elettrica e dei fenomeni di trasporto, applicate allo sviluppo di nuovi e versatili sistemi di accumulo termico a sali fusi, alimentabili sia con il calore prodotto dagli impianti CSP, sia con l'elettricità da altre tecnologie rinnovabili. Tali sistemi saranno caratterizzati da elevata efficienza e velocità di carica per una maggiore flessibilità nel bilanciamento del binomio produzione-domanda. Ciò potrà incrementare la competitività dell'intera filiera nazionale (ricerca e industria) del CSP e favorire la creazione di nuove collaborazioni tra aziende operative in settori diversi (fornitori di serbatoi di accumulo termico, fornitori di sistemi di riscaldamento elettrico resistivo, per induzione o micro-onde). L'ingegneria di sistema ed i modelli sviluppati nell'ambito delle attività progettuali finalizzate alla simulazione e ottimizzazione di impianti ibridi CSP/PV/Eolici di scala medio-piccola operanti sui mercati MGP e MSD, permetteranno di evidenziare economicamente il vantaggio delle tecnologie ibride favorendo dunque investimenti 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 (ad esempio i riscaldatori elettrici). Gli algoritmi di ottimizzazione sviluppati potranno essere di supporto sia nella fase di design degli impianti da parte di società di ingegneria che nella fase di operation dai gestori di impianti ibridi. Ricadute applicative concrete di sicuro interesse per società che costruiscono e/o gestiscono impianti CSP a sali fusi (in particolare a collettori lineari, sia parabolici che Fresnel) sono facilmente prevedibili con riferimento ai risultati di due linee di attività proposte proprio su input diretto del settore industriale del CSP. Trattasi dell'attività di sviluppo di soluzioni tecniche per la diagnosi in remoto della incipiente/avvenuta formazione di occlusioni solide all'interno del piping di impianti CSP a sali fusi, che avrà come output di fine Progetto la configurazione preliminare di un dispositivo di rilevazioni ad ultrasuoni (inclusa una valutazione di massima del suo costo), e dell'attività di messa a punto di procedure operative per impianti CSP con fluido termovettore costituito da miscele di sali fusi bassofondenti, incluso lo studio della compatibilità dei materiali da costruzione a contatto con le miscele in condizioni reali di funzionamento, che fornirà informazioni fondamentali alle industrie del settore sia nella scelta dei materiali da costruzione sia nella gestione delle principali fasi operative degli impianti CSP a sali fusi.

## 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; in particolare, complessivamente verranno elaborati ed emessi n° 26 report, con la descrizione dei risultati ottenuti al termine di ogni linea di attività (LA), e saranno realizzati n° 5 prototipi e n° 1 dispositivo sperimentale.

Gli elementi per la verifica dell'esito del Progetto sono rappresentati dai risultati e dai prodotti delle diverse attività di ricerca previste nell'ambito del triennio 2022-2024. 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. Il secondo riguarda, invece, l'analisi dell'efficacia dei risultati, cioè la corrispondenza tra i risultati ottenuti a fine Progetto e quelli previsti all'inizio ovvero nel capitolato tecnico del Progetto. Questa valutazione potrebbe essere effettuata tramite una analisi dei dati/informazioni basata sulle concordanze/discordanze dei diversi interlocutori: beneficiari diretti, referenti, gestori del progetto, docenti universitari, ecc.

La valutazione dei risultati finali del Progetto potrà essere effettuata, nel dettaglio, attraverso la valutazione dei report tecnici elaborati, nei quali sarà riportata in modo esaustivo e completo la descrizione dei risultati ottenuti e dei prodotti tangibili quali prototipi realizzati e caratterizzati sperimentalmente, nuovi dispositivi per la sperimentazione di tecnologie innovative e up-grade di preesistenti dispositivi, impianti e, in generale, facility sperimentali.

In particolare, nel caso di nuovi prodotti (prototipi/dispositivi) sviluppati e realizzati, 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 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 "materiali e componenti avanzati per impianti CSP":

- Coating innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti CSP a collettori lineari (LA1.1, LA1.2, LA1.3): saranno emessi n° 3 report tecnici, reso disponibile il progetto ottico di n° 4 coating per tubo ricevitore di sistemi micro-PTC, con prestazioni fototermiche ottimizzate per temperatura operativa di 200, 250, 300 e 350 °C, e realizzati (i) n° 1 prototipo di coating per il tubo ricevitore evacuato del sistema micro-PTC proposto da UniFl, per temperatura operativa massima di 350 °C, depositato su tubo di acciaio di diametro esterno 10 mm, spessore di parete 1 mm e lunghezza dell'ordine dei 500 mm, e (ii) n° 1 prototipo di coating per tubo ricevitore evacuato di impianti CSP, per temperatura operativa massima di 550 °C, depositato su tubo di acciaio di diametro esterno 70 mm, spessore di parete 2 o 3 mm e lunghezza dell'ordine dei 500 mm. La verifica dei risultati potrà essere effettuata mediante test strumentali per la valutazione dei parametri prestazionali fototermici e della stabilità in temperatura dei prototipi di coating; inoltre, la verifica dei risultati del progetto ottico potrà essere effettuata nel dettaglio mediante la valutazione del report tecnico emesso nell'ambito della linea di attività LA1.2.
- Tecnologia micro-CSP basata su sistemi di tipo micro-PTC per la generazione distribuita di energia in contesti civili e industriali (LA1.4,

LA1.5, LA1.6): saranno emessi n° 3 report tecnici e resi disponibili (i) un'analisi del potenziale applicativo della tecnologia micro-CSP basata su sistemi di tipo micro-PTC per la generazione distribuita di calore, elettricità ed energia frigorifera in contesti civili e industriali del territorio italiano, e (ii) il progetto di up-grade di un prototipo di sistema micro-PTC proposto da UniFI, per temperatura operativa massima di 350 °C. La valutazione dei risultati potrà essere effettuata mediante test del suddetto prototipo di sistema micro-PTC, proposto dal co-beneficiario UniFI e sviluppato in attività di ricerca antecedenti a quelle di Progetto, che simulino reali condizioni di utilizzo in contesti industriali. I suddetti test saranno eseguiti presso l'impianto ENEA-SHIP del C.R. ENEA di Casaccia e/o in laboratorio. Inoltre, la verifica dei risultati dell'analisi e del progetto di up-grade potrà essere effettuata nel dettaglio mediante la valutazione dei report tecnici emessi nell'ambito delle linee di attività LA1.4 e LA1.6.

- Superfici riflettenti autopulenti con sensoristica integrata per impianti CSP (LA1.7, LA1.8, LA1.9): saranno emessi n° 3 report tecnici e realizzati (i) n° 1 prototipo di superficie riflettente autopulente di dimensioni compatibili con impianti solari sperimentali, predisposta all'integrazione di sensori, e (ii) n° 1 prototipo di sensore, su scala laboratoriale, integrabile in rivestimenti autopulenti per specchi solari. La valutazione dei risultati potrà essere effettuata mediante test di verifica sull'efficacia dello scaling-up da una scala laboratoriale di messa a punto delle formulazioni nanocomposite ibride a bagnabilità modulabile (substrati 5x5 cm) ad una scala di dimensionalità intermedia (> 40x40 cm, dipendentemente dal processo di deposizione), idonea a comporre moduli di specchi per impianti reali, avvalendosi di tecniche di processing dei polimeri (spray, stampa) e/o di tecniche di deposizione per sputtering per la produzione su larga scala anche degli elementi sensoristici integrabili. Nella fattispecie, per ciascuna soluzione autopulente saranno definiti i parametri di deposizione su scala prototipale al fine di massimizzare l'effetto autopulente (modulazione della bagnabilità dello strato esposto passando da angoli di contatto statici WCA compresi tra 40° e 50°, tipici del vetro degli specchi, a WCA > 90° per rivestimenti idrofobici e < 20° per rivestimenti idrofilici), preservare la riflettanza (R% specchio solare - R% autopulente < 8), rivestire superfici compatibili con impianti reali (area > 40x40 cm), per rendere "smart" il campo solare attraverso sensoristica mirata.

- Sistemi di accumulo termo-chimico a zeoliti per applicazioni distribuite a media temperatura del CSP (LA1.10): sarà emesso n° 1 report tecnico, realizzato l'up-grade delle facility di test dei sistemi di accumulo termo-chimico a zeoliti del C.R. ENEA di Trisaia, per estenderne l'operatività tra 150 e 250 °C, e resa disponibile un'analisi del potenziale applicativo dei sistemi di accumulo termo-chimico a zeoliti per la fornitura di calore a media temperatura (< 250 °C) per applicazioni (civili e industriali) distribuite di piccola taglia. La valutazione dei risultati potrà essere effettuata 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, ispezione in loco delle facility di test di cui è realizzato l'up-grade e valutazione del report tecnico emesso nell'ambito della linea di attività LA1.10.

Tematica scientifico-applicativa sull'"ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili":

- Sistemi di accumulo termico, di tipo termoclino, ibridizzati alimentabili da CSP e da altre tecnologie energetiche rinnovabili, per la produzione di calore per processi industriali (LA1.11, LA1.12, LA1.13, LA1.14): saranno emessi n° 4 report tecnici e realizzati (i) n° 1 prototipo di sistema di accumulo termico, di tipo termoclino, ibridizzato tra CSP ed altre fonti energetiche rinnovabili, e (ii) l'up-grade dell'impianto sperimentale Fresnel "ENEASHIP" del C.R. ENEA di Casaccia, per asservire il prototipo di sistema di accumulo termoclino ibridizzato (la facility sperimentale, a seguito di up-grade, costituirà un dimostratore tecnologico di un impianto CSP ibridizzato per la fornitura di calore solare per processi industriali); saranno, inoltre, resi disponibili (i) procedure operative di gestione di un impianto CSP ibridizzato, ottimizzate per produzione di calore o cogenerazione di calore/elettricità per processi industriali, (ii) un modello numerico del prototipo di sistema di accumulo termoclino ibridizzato (con tre serpentine immerse nei sali fusi) e (iii) un modello numerico di un ulteriore sistema di accumulo termoclino ibridizzato (con due serpentine e resistenze elettriche immerse nei sali fusi). 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 dell'impianto "ENEASHIP" con asservito il prototipo di sistema di accumulo termoclino ibridizzato.

- Sistemi innovativi di riscaldamento elettrico dei sali fusi per l'ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili (LA1.15, LA1.16, LA1.17, LA1.18): saranno emessi n° 4 report tecnici, realizzato n° 1 dispositivo sperimentale per il riscaldamento elettrico ad alta efficienza dei sali fusi e resi disponibili modelli numerici di sistemi innovativi di riscaldamento elettrico dei sali fusi. 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 dispositivo sperimentale appositamente realizzato.

- Simulazione e ottimizzazione di impianti ibridi CSP/PV/Eolici di scala medio-piccola operanti sui mercati MGP e MSD (LA1.19): sarà emesso n° 1 report tecnico e resi disponibili (i) modelli numerici e una metodologia innovativa per l'ottimizzazione di impianti ibridi CSP/PV/Eolici e (ii) design e analisi tecnico-economica di impianti ibridi CSP/PV/Eolici (con particolare riferimento a quelli di scala medio-piccola operanti sui mercati MGP e MSD). I modelli, la metodologia, il design e l'analisi tecnico-economica saranno descritti nel report tecnico emesso nell'ambito della LA1.19. 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 LA1.19.

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

- Tecnologie ad ultrasuoni per sistemi di rilevazione di occlusioni solide all'interno del piping di impianti CSP utilizzando miscele di sali fusi come fluido termovettore (LA1.20): sarà emesso n° 1 report tecnico inclusivo della configurazione preliminare (ovvero di progetto di massima) di un dispositivo di diagnosi ad ultrasuoni per la rilevazione di occlusioni di miscele di sali solidificati nel piping di impianti CSP a sali fusi. La valutazione dei risultati potrà essere effettuata mediante analisi teoriche e valutazioni numeriche agli elementi finiti finalizzate

alla valutazione delle modifiche della conformazione spaziale del campo prodotto da un trasduttore ad ultrasuoni nella miscela di sali fusi derivante dall'incipiente innesco della solidificazione dei sali e/o dalla preliminare formazione di occlusioni solide sia in assenza (sezione costante) sia in presenza (pezzi speciali) di discontinuità geometriche della tubazione. Inoltre, la verifica della configurazione preliminare (ovvero del progetto di massima) del dispositivo di diagnosi ad ultrasuoni potrà essere effettuata nel dettaglio mediante la valutazione del report tecnico emesso nell'ambito della linea di attività LA1.20.

- Procedure operative per impianti CSP con fluido termovettore costituito da miscele di sali fusi bassofondenti e studio della compatibilità dei materiali a contatto con le miscele in condizioni reali di funzionamento (LA1.21, LA1.22, LA1.23, LA1.24): saranno emessi n° 4 report tecnici e resi disponibili (i) procedure ottimizzate per la gestione operativa, ordinaria e di emergenza, degli impianti CSP a sali fusi di scala commerciale, e (ii) una lista di acciai idonei per l'utilizzo, in ambito industriale, in qualità di materiali da costruzione per la realizzazione di componenti e/o sottosistemi di impianti CSP a sali fusi bassofondenti. La valutazione dei risultati potrà essere effettuata mediante l'analisi dei report tecnici elaborati, nei quali verranno descritte le procedure operative per la gestione di particolari condizioni di funzionamento degli impianti CSP, e attraverso i risultati delle prove sperimentali e delle analisi chimiche condotte sugli acciai testati per verificarne la compatibilità con le miscele di sali fusi bassofondenti.

Infine, con riferimento alle linee di attività sulla "Comunicazione e disseminazione dei risultati" (LA1.25 e LA1.26) saranno emessi ulteriori n° 2 report, uno per ogni LA, e sarà costantemente aggiornata la sezione dedicata alla Ricerca di Sistema elettrico del sito web dell'affidatario ENEA che consentirà di mettere in evidenza i principali risultati conseguiti nel periodo di riferimento delle attività.

Complessivamente nel corso del triennio di Progetto, fermo restando l'assenza d'imprevisti riconducibili ad una eventuale recrudescenza della pandemia da COVID-19, 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 e discussi nell'ambito del congresso annuale organizzato da SolarPACES. Complessivamente nel corso del triennio di Progetto, verranno, inoltre, organizzati almeno 2 eventi di disseminazione, di cui uno conclusivo a fine Progetto, primariamente rivolti agli stakeholder nazionali e ai Ministeri competenti, per un supporto tecnico-scientifico all'industria nazionale del CSP e un supporto programmatico rivolto ai decision-maker politici. Infine, complessivamente nel corso del triennio di Progetto, si prevede un numero minimo di 9 tra pubblicazioni su riviste scientifiche nazionali/internazionali indicizzate e atti di congresso/conferenza.