

PIANO TRIENNALE DI REALIZZAZIONE 2019-21 - RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO NAZIONALE
Progetti di ricerca di cui all'art. 10 comma 2, lettera a) del decreto 26 gennaio 2000

AFFIDATARIO 1

Tema - Titolo del progetto: **1.9 Solare Termodinamico**

Durata: **36 mesi**

Semestre n. **5** – Periodo attività: **01/01/2021** – **30/06/2021**

ABSTRACT ATTIVITA' SEMESTRALE:

L'attività di ricerca svolta nel primo semestre del 2021, nell'ambito del progetto 1.9 "Solare Termodinamico", ha permesso di completare alcune attività iniziate nel 2020 e di iniziare nuove linee di attività all'interno delle macro-tematiche in cui è strutturato il progetto. Alcune delle nuove attività di ricerca iniziate a Gennaio 2021 sfruttano i risultati ottenuti in corrispondenti linee di attività concluse nelle annualità precedenti. Le attività di ricerca sono state condotte dall'ENEA con sei Università Italiane: Università "La Sapienza" e Tor Vergata di Roma, Università di Perugia, Università di Palermo, Politecnico di Milano e Politecnico di Torino.

In particolare, sono proseguite le attività di sviluppo di materiali e componenti innovativi, tra cui fluidi termici, tubi ricevitori, superfici riflettenti e sistemi di accumulo termico. Ulteriori sviluppi sono stati prodotti sugli studi d'integrazione di sistema, riguardanti l'introduzione della tecnologia del Solare a Concentrazione in casi applicativi d'interesse Nazionale, tra cui i contesti industriali energivori, e l'ibridizzazione con fonti e tecnologie rinnovabili "non programmabili" come il fotovoltaico; sono inoltre proseguiti gli studi di caratterizzazione e previsione meteorologica, per la validazione di metodologie utili all'analisi delle prestazioni e alla gestione d'impianti solari a concentrazione.

Come il 2020, anche nel primo semestre del 2021 le attività di ricerca da parte di ENEA e dei co-beneficiari sono in parte state rallentate dalle restrizioni imposte dell'emergenza sanitaria.

ATTIVITA' SVOLTE	
AFFIDATARIO / COBENEFICIARIO	SINTESI DELLE ATTIVITÀ DI RICERCA SVOLTE, RISULTATI CONSEGUITI E RICADUTE SUL SETTORE PRODUTTIVO
ENEA	Durante il 1° semestre del 2021 sono proseguiti gli studi di ENEA sulla tematica riguardante lo sviluppo di fluidi termici avanzati per CSP. La prima linea di attività sui fluidi termici innovativi nel 1° semestre del 2021 ha riguardato la "valutazione della stabilità chimica di nuove miscele di sali fusi bassofondenti" (LA1.3). La prima parte del lavoro è stata dedicata alla scelta dell'apparecchiatura sperimentale da utilizzare: è stata identificata una facility, sviluppata nell'ambito di un precedente progetto europeo, che consente, attraverso agitazione meccanica, di omogeneizzare le miscele in maniera tale da effettuare test a temperatura costante e controllata. Prima di iniziare l'attività sperimentale, è stato anche

necessario pianificare i necessari interventi sull'apparecchiatura, per permettere un funzionamento a elevate temperature per lunghi periodi.

Una seconda attività del primo semestre del 2021 (LA. 1.4) ha permesso lo sviluppo e l'elaborazione di un database open-source di proprietà termo-fisiche di nuove miscele di sali fusi bassofondenti, disponibile e facilmente consultabile, per rendere fruibili in modo rapido ed efficace i risultati delle linee LA1.1, LA1.2, LA1.3, LA1.5-8, integrando i nuovi dati ottenuti con la letteratura scientifica.

Questo database consente una veloce e facile ricerca delle proprietà di diversi fluidi termici, suddivisi tra sistemi a calore sensibile e latente, sistemi di accumulo chimico e oli diatermici, permettendo una loro appropriata selezione per applicazioni pratiche, grazie alla possibilità di impostare dei filtri di ricerca a seconda della composizione, della temperatura o del calore desiderato. Il primo periodo di questa attività è stato dedicato allo studio dello sviluppo del codice del modello e alle modalità di integrazione con i dati da considerare.

L'attività svolta da ENEA nell'ambito della linea L.A. 1.6 "Studi di compatibilità di nuove miscele di sali fusi con leghe metalliche in condizioni dinamiche", rappresenta un proseguimento della LA1.5, ed è stata focalizzata sulla caratterizzazione della corrosione in dinamico fra miscele di nitrati metallici, e quattro tipi diversi di acciaio rappresentativi dei materiali da costruzione utilizzati negli impianti CSP. In particolare, seguendo la metodologia utilizzata per la linea precedente L.A. 1.5, nel primo semestre 2021 sono state selezionate le miscele di sali da utilizzare; il "Solar Salt", rappresentativo di miscele operanti sopra i 500°C, e una miscela ternaria note commercialmente "Hitec XL[®]", che è invece rappresentativa di materiali bassofondenti (sotto i 150°C) e stabili fino intorno ai 400°C. Riguardo le leghe testate, sono state selezionate due diverse tipologie di acciai inox (AISI 316L e AISI 430 SS), un acciaio a basso contenuto di cromo (T91) e un acciaio al carbonio (516 gr 70). Nel primo semestre è stato anche ottimizzato il setup sperimentale dedicato idoneo al testing in condizioni dinamiche, cioè con le miscele di nitrati portate in movimento sulla superficie dei provini metallici. Le prove di corrosione sono state condotte per un periodo di circa 1500 ore con entrambi i sali.

Durante il 1° semestre del 2021 sono inoltre proseguiti gli studi di ENEA sulla linea di attività LA1.11 riguardanti lo sviluppo del dispositivo di misura della conducibilità termica di fluidi ad alta temperatura. La fase di reperimento e fornitura dei materiali da costruzione della cella di misura ha richiesto del tempo, come anche la lavorazione meccanica del quarzo e del rame.

Durante il 1° semestre del 2021 sono proseguiti gli studi di ENEA sulla tematica riguardante lo sviluppo di NEPCM su nuove linee di attività (LA1.16). In particolare, lo scambiatore di calore, realizzato in precedenza, al cui interno un materiale nano-caricato (SS-CATAS) è confinato in tre capsule, è stato caratterizzato attraverso prove di riscaldamento e raffreddamento eseguite utilizzando l'impianto sperimentale ATES, presente presso ENEA Casaccia. Il lavoro di caratterizzazione dell'efficienza dello scambio termico di una nuova tipologia NEPCM (in cambio di fase solido-liquido e convezione naturale) ha consentito di mettere in evidenza l'effetto delle nanoparticelle sulle principali caratteristiche di scambio termico, come ad esempio la capacità termica e la diffusività termica, e la possibilità di utilizzarlo come fluido termovettore (nano-fluido, NF, in sola fase liquida e convezione forzata) al fine di incrementare le prestazioni di un campo solare di un impianto CSP

Oltre allo sviluppo di fluidi termici avanzati per CSP, nel 1° semestre del 2021 sono proseguite le attività di sviluppo di specifici componenti avanzati per CSP, tra cui tubi ricevitori e specchi.

In particolare, per quanto riguarda i tubi ricevitori, nel 1° semestre 2021, come previsto nella Richiesta di Variante del Progetto 1.9 "Solare Termodinamico", sono state ultimate le attività inerenti allo sviluppo del processo di fabbricazione, ad alta velocità di deposizione, per la realizzazione di materiali nanocompositi ceramico-metallici (CERMET) a base di allumina (Al_2O_3) e di lega tungsteno-cromo-titanio (WCrTi) da impiegarsi in qualità di strati assorbitori di rivestimenti per tubi ricevitori solari operanti in aria alla temperatura di 500 °C.

I materiali realizzati sono stati sottoposti a trattamenti termici in aria a 500 °C per una durata complessiva di 60 giorni per valutarne la stabilità ottica e strutturale. Nella fattispecie, i test termici sono stati condotti su strutture bi-layer, composte da uno strato CERMET WCrTi- Al_2O_3 ricoperto da un film ceramico di Al_2O_3 , atte a simulare condizioni operative prossime a quelle reali

di un CERMET impiegato all'interno di un rivestimento solare (il quale termina sempre con uno strato ceramico antiriflesso a protezione degli strati CERMET sottostanti). La sperimentazione condotta ha dimostrato che, a valle di una fase di assestamento relativamente lunga, i CERMET WCrTi-Al₂O₃ realizzati si stabilizzano subendo, nel tempo, variazioni trascurabili delle loro proprietà ottiche e risultando, pertanto, idonei all'utilizzo come strati assorbitori di rivestimenti per tubi ricevitori solari operanti in aria a 500 °C. Inoltre, evidenziato che a temperature inferiori di 500 °C i materiali presentano stabilità ottico-strutturale confrontabile, se non maggiore, rispetto a quella mostrata a 500 °C, ne consegue che gli stessi possono essere efficacemente impiegati in qualità di assorbitori multistrato CERMET a elevate prestazioni fototermiche per rivestimenti solari operanti in aria anche a temperature più basse, nel range 300-500 °C.

Sempre per quanto riguarda i tubi ricevitori, nel primo semestre 2021, nell'ambito della linea di attività sulla "realizzazione di coating ad alta stabilità per tubi ricevitori solari evacuati e non evacuati" (LA 1.19), è stato progettato e realizzato, mediante processi di fabbricazione d'interesse industriale, un rivestimento per tubi ricevitori solari operanti in vuoto alla temperatura di 550 °C. Detto rivestimento prevede un riflettore IR in W, un assorbitore solare costituito da un multistrato (6 strati) CERMET di W-Al₂O₃ e un antiriflesso costituito da uno strato di Al₂O₃ disposto sull'assorbitore, da uno strato CERMET di W-Al₂O₃ a basso contenuto metallico e, infine, da uno strato di SiO₂.

Il rivestimento realizzato presenta un'assorbanza solare pari a 95.10% e un'emissività termica, a 550 °C, pari a 9.87%. I valori ottenuti evidenziano un miglioramento dell'emissività termica di circa mezzo punto percentuale rispetto al prodotto commerciale di riferimento per temperatura operativa di 550 °C. Un miglioramento più significativo si è ottenuto in termini di durabilità del nuovo rivestimento: test sperimentali hanno infatti evidenziato un degrado dell'assorbanza solare del nuovo rivestimento pari allo 0.48% dopo 25 anni di servizio a 550 °C, a fronte di un degrado dell'assorbanza solare del rivestimento del suddetto tubo ricevitore di riferimento pari a 1,65% nelle stesse condizioni operative.

Come previsto da Progetto, il nuovo rivestimento è stato utilizzato per realizzare un prototipo di coating per ricevitori solari operanti in vuoto alla temperatura di 550 °C, depositato su tubo di acciaio inossidabile (diametro esterno 70 mm, spessore di parete 3 mm e lunghezza 60 cm).

Per quanto riguarda gli specchi, durante il 1° semestre del 2021 sono proseguiti gli studi di ENEA sulla tematica riguardante lo sviluppo di rivestimenti per superfici riflettenti per la messa a punto della tecnica per depositare su larga area i rivestimenti polimerici ibridi individuati nel corso della precedente annualità come uno dei materiali idonei all'ottenimento di superfici riflettenti autopulenti e/o a basso consumo d'acqua di lavaggio per riflettori FSM (substrati pellicolari polimerici e/o metallici). La tecnica individuata per la deposizione è la tecnica spray HVLP (High Volume Low Pressure), scelta per la sua economicità (basso costo), versatilità e scalabilità. Tale tecnica richiede diversi step di lavorazione e per ciascuno di essi si è resa necessaria una fase di ottimizzazione. Tutti i campioni prodotti in questa fase sono stati caratterizzati in termini di proprietà ottiche e di bagnabilità e valutati in termini di uniformità di deposizione (mediante misure puntuali dello spessore). È stato realizzato un prototipo di rivestimento a ridotto consumo di acqua di lavaggio su uno specchio solare 50 x 50cm.

Durante il 1° semestre del 2021 sono iniziati gli studi di ENEA sulla tematica riguardante lo sviluppo di sistemi di accumulo termico basati sull'utilizzo di zeoliti. In particolare, nel corso del primo semestre, sono stati condotti degli studi preliminari su sistemi di stoccaggio innovativi, basati sull'uso di zeoliti sintetiche, in grado di immagazzinare e rilasciare calore termo-chimico durante le fasi di desorbimento e adsorbimento di vapore acqueo in condizioni di basso vuoto (10-50 mbar assoluti). A valle di tali studi preliminari, è stata condotta un'attività modellistica tesa a studiare le dinamiche di carica/scarica del sistema di accumulo termico a zeoliti, mediante l'implementazione di un modello di simulazione a parametri concentrati in grado di fornire informazioni sui profili termici che s'instaurano all'interno del serbatoio di stoccaggio in diverse condizioni operative.

Oltre allo sviluppo di materiali e componenti innovativi per CSP, nel 1° semestre del 2021 sono proseguite le attività di ENEA sull'integrazione della tecnologia del Solare Termodinamico nel sistema energetico Nazionale.

	<p>In particolare, durante il 1° semestre del 2021 sono proseguite le attività di ENEA sulla realizzazione della piattaforma sperimentale ENEA SHIP (LA1.37), funzionale allo studio di soluzioni tecniche per la produzione di calore di processo da impianti solari a concentrazione. La società aggiudicatrice della procedura negoziata per la realizzazione dell'impianto ha installato e messo in opera una linea di collettori lineari del tipo Fresnel sperimentale, integrata con due aerotermi, che simulano l'utenza industriale, e con un riscaldatore elettrico, che simula una prima sezione del campo solare. Il circuito è stato inoltre dotato di buffer di accumulo, vaso di espansione e pompa di circolazione, ed è stato strumentato con rilevatori di temperatura, pressione e portata (olio e aria) per il controllo in remoto delle attività sperimentali. La realizzazione dell'impianto ha avuto una durata superiore al timing previsto a causa di difficoltà nell'approvvigionamento dei materiali, soprattutto per i componenti del campo solare.</p> <p>Infine, nel 1° semestre del 2021 sono proseguiti gli studi di ENEA sulla tematica riguardante lo sviluppo di la caratterizzazione meteorologica su una nuova linea di attività riguardante lo sviluppo di modelli di previsione a breve termine della radiazione solare. E' stata fatta un'elaborazione dei dati di radiazione solare (diretta normale, globale orizzontale e diffusa orizzontale) acquisiti dalla stazione solarimetrica dell'ENEA Casaccia. Tale elaborazione ha permesso di sviluppare un modello locale di decomposizione della radiazione globale orizzontale nelle componenti diretta normale e diffusa orizzontale.</p>
<p>Università degli Studi di Roma "Tor Vergata"</p>	<p>Durante il 1° semestre del 2021, l'attività dell'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata" è stata finalizzata ad individuare le migliori combinazioni fluido termovettore - materiale da costruzione in diversi intervalli operativi di temperatura in condizioni dinamiche e quindi rappresentative delle reali condizioni di utilizzo degli impianti solari a concentrazione.</p> <p>Sono stati studiati i materiali da caratterizzare forniti da ENEA e trattati termicamente nella LA1.6 e sono stati ottimizzati i metodi per realizzare analisi metallografiche (SEM/EDX/XRD) sulle diverse tipologie di acciai sottoposti a prove di compatibilità con miscele di sali fusi in condizioni dinamiche; è stata realizzata un'elaborazione modellistica, ove possibile, dei dati ottenuti.</p> <p>Seguendo le modalità già descritte nella LA1.7, mediante le analisi di microscopia elettronica (SEM) sono stati evidenziati i fenomeni di corrosione eventualmente occorsi e, attraverso l'analisi EDX è stato studiato lo spessore e la composizione degli strati ossidati. La composizione delle fasi solide negli strati ossidati è stata studiata mediante analisi XRD.</p>
<p>Università "La Sapienza" Dip. Ing. Chimica, Materiali, Ambiente</p>	<p>Durante il 1° semestre del 2021, il Dip. Ing. Chimica, Materiali, Ambiente dell'Università "La Sapienza" ha svolto il lavoro di ricerca (LA1.10) che si è focalizzato sull'ottimizzazione dei punti di misura di temperatura (posizionamento delle sonde), e sulla messa a punto di modelli dettagliati (CFD) per la corretta interpretazione del dato sperimentale e quindi della misura della conducibilità termica di fluidi termici ad elevata temperatura.</p>
<p>Università di Perugia Dip. Ing. Civile e Ambientale</p>	<p>Nel 1° semestre del 2021, il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università di Perugia ha studiato nuovi materiali migliorati per l'accumulo (NEPCM) e di nano fluidi (NF) per il trasferimento di calore per incrementarne l'efficienza termica in tutte le fasi operative dei CSP operanti ad alta temperatura (300-550 °C) (LA1.14). In particolare, lo studio preliminare dei materiali a cambio di fase (PCM) ha condotto alla scelta di due diversi PCM per coprire questo ampio range di temperature: il nitrato di potassio (KNO₃) e una miscela ternaria di sali cloruri di magnesio (MgCl₂), di potassio (KCl) e di sodio (NaCl) (MgCl₂:KCl:NaCl, 44.7:25.8:29.4 mol). Le preparazioni di KNO₃ ed ETC sono state sintetizzate con il metodo innovativo a basso costo e impatto energetico/ambientale per liquid-assisted compounding (LAC) associata ad essiccazione in depressione (VD). La selezione delle nanocariche, da utilizzare nei PCM per migliorare le proprietà di accumulo e trasferimento del calore è stata effettuata in base alla letteratura scientifica e all'esperienza degli enti di ricerca. Per la formulazione dei nove materiali sulla base dei due PCM sono state considerate nano cariche a base di ossidi e nitrucci metallici e semi-metallici, minerali, e strutture organo/inorganiche (MOF) sia commerciali che parzialmente o completamente di sintesi UNIPG. Si è tenuto conto di alcuni parametri, quali tipo, forma, distribuzione dimensionale, resistenza alla corrosione, determinanti per la risposta dei materiali dal punto di vista termico.</p>

<p>Politecnico di Torino Dip. Energia</p>	<p>Durante il 1° semestre del 2021 sono proseguiti gli studi del Dip. Energia del Politecnico di Torino a supporto dello sviluppo di componentistica avanzata per CSP, tubi ricevitori solari e sistemi innovativi di accumulo termico, rispettivamente su due nuove linee di attività.</p> <p>Per quanto riguarda la linea di attività LA1.21, dal titolo “analisi delle prestazioni termiche di ricevitori con coating selettivi a bassa emissività in aria” il Politecnico di Torino intende valutare numericamente e confrontare il rendimento termico di due tecnologie di collettori lineari: i collettori parabolici con tubo ricevitore evacuato e i collettori di tipo Fresnel con tubo ricevitore non evacuato. Per le due tecnologie si considerano rivestimenti selettivi diversi, essendo necessario applicare un coating stabile in aria nel caso del tubo non evacuato. I collettori di tipo Fresnel montano un concentratore secondario di tipo CPC, la cui presenza altera il flusso di aria esterna intorno al tubo ricevitore e, di conseguenza, le perdite termiche per convezione dal tubo di vetro all’ambiente esterno. Al fine di valutare le perdite convettive, nel corso del 1° semestre il Politecnico di Torino ha sviluppato un modello CFD 2D (sezione trasversale all’asse del ricevitore) per il caso dei collettori Fresnel. Questo modello simula il solo flusso esterno considerando la presenza del collettore secondario, la forzante termica è rappresentata dalla temperatura imposta del vetro. Tale modello ha permesso di ricavare delle correlazioni per le perdite convettive dal tubo di vetro all’ambiente esterno. Le correlazioni così ottenute verranno implementate in un modello a parametri concentrati per il calcolo delle prestazioni termiche del tubo ricevitore.</p> <p>Riguardo la linea di attività LA1.30, dal titolo “analisi termo-fluidodinamica del sistema di stoccaggio di energia solare termocline a sali fusi per CSP a singolo scambiatore rinforzato con sistemi a PCM”, il Politecnico di Torino ha proseguito il lavoro iniziato nel corso della linea di attività LA 1.29, in cui si è sviluppato e convalidato un modello CFD assialsimmetrico del sistema di accumulo termocline proposto dall’ENEA. L’obiettivo della presente linea di attività è quello di valutare numericamente le potenzialità date dall’inserimento nel serbatoio di inserti contenenti materiale a cambiamento di fase (PCM), in termini di prestazioni termiche. Nel corso del 1° semestre del 2021 il Politecnico di Torino ha determinato (1) in quale regione del serbatoio di accumulo sia conveniente inserire i PCM, (2) quale materiale a cambiamento di fase sia il più idoneo, in funzione della temperatura di fusione, e (3) quale geometria adottare per gli inserti contenenti il materiale a cambiamento di fase. Si è deciso di inserire il PCM nella parte alta del serbatoio, dove la temperatura dei sali è maggiore, adottando il nitrito di sodio (NaNO₂) come materiale a cambiamento di fase, la cui temperatura di fusione (270 °C) risulta compatibile con quella attesa dei sali. Gli inserti contenenti il materiale a cambiamento di fase corrispondono ad un banco tubiero costituito da tubi toroidali, opportunamente dimensionato sulla base di una analisi preliminare.</p>
<p>Università di Palermo Dip. Ing. Sezione Chimica Ambientale Biomedica e Materiali</p>	<p>Nel 2021 il Dipartimento di Ingegneria (Sezione Chimica Ambientale, Biomedica e Materiali) dell’Università di Palermo ha analizzato diversi casi studio d’interesse applicativo come esempi di processi chimici energivori da alimentare con impianti solari a concentrazione. E’ iniziata inoltre l’analisi di diverse strategie operative con cui realizzare l’accoppiamento.</p> <p>In particolare, nel 1° Semestre del 2021 è stata avviata l’attività di valutazione delle strategie di accoppiamento tra un impianto CSP e i processi chimici selezionati nel corso della LA1.34. Sono stati esaminati alcuni scenari di interesse per la produzione di combustibili sintetici e prodotti chimici. Si tratta in generale di processi chimico-fisici endotermici che richiedono quindi una somministrazione di calore che può essere fornita mediante un’ibridizzazione con l’impianto solare a concentrazione ottenendo così sia una riduzione delle emissioni di biossido di carbonio che una riduzione del consumo di combustibili fossili, generalmente metano.</p>
<p>Politecnico di Milano Dip. Energia</p>	<p>Nel 1° semestre del 2021 il Dipartimento Energia del Politecnico di Milano, nell’ambito della tematica dell’ibridizzazione del CSP con il fotovoltaico, in continuità con quanto svolto nel 2020, ha iniziato l’analisi di alcuni casi studio di impianti ibridi CSP/PV. Le mappe caratteristiche prodotte nell’attività precedente volte a descrivere il comportamento dei diversi cicli termodinamici, dei campi specchi e del campo fotovoltaico sono state utilizzate come dati di input per la formulazione del problema di ottimizzazione. A partire da questi dati, è stato formulato un problema di ottimizzazione volto a minimizzare il costo totale annuale di generazione elettrica del sistema ibrido CSP/PV utilizzando la tecnica di programmazione lineare misto-intera (Mixed-Integer Linear Programming, MILP) in grado di ottimizzare contemporaneamente il design dei</p>

	<p>diversi componenti dell'impianto (taglia dei campi specchi, del campo fotovoltaico, del blocco di potenza e dei sistemi di accumulo termico ed elettrico) e di fornire la strategia di gestione ottima dell'impianto lungo l'orizzonte di ottimizzazione. Le equazioni caratterizzanti i diversi blocchi di potenza e dell'accumulo termico sono state opportunamente linearizzate per poter essere gestite nell'ottimizzatore MILP, mentre le curve di produzione termica ed elettrica di un anno tipo (TMY) per i diversi campi specchi e per il campo fotovoltaico sono state prodotte tramite il software SAM e normalizzate per metro quadro di area attiva occupata. Infine, per ridurre la scala temporale del problema di ottimizzazione e con essa il tempo computazionale, si è deciso di formulare il MILP su un numero limitato di periodi rappresentativi e di periodi estremi dell'anno solare, selezionati utilizzando l'algoritmo di clustering k-MILP.</p>
--	--