

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. **6** – Periodo attività: **01/07/2021** – **31/12/2021**

ABSTRACT ATTIVITA' SEMESTRALE:

L'attività di ricerca svolta nel secondo semestre del 2021, nell'ambito del progetto 1.9 "Solare Termodinamico", ha permesso di completare alcune attività iniziate nel 2020 e di completare tutte le linee di ricerca previste all'interno delle macro-tematiche in cui è strutturato il progetto. 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 state finalizzate le attività di sviluppo di materiali e componenti innovativi, tra cui fluidi termici, tubi ricevitori, superfici riflettenti e sistemi di accumulo termico. Ulteriori risultati sono stati conseguiti nell'ambito degli 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 terminati gli studi di caratterizzazione e previsione meteo-climatica, per la validazione di metodologie utili all'analisi delle prestazioni e alla gestione d'impianti solari a concentrazione.

Nel secondo semestre del 2021 è stato inoltre possibile completare le attività di ricerca da parte di ENEA e dei co-beneficiari in parte rallentate dalle restrizioni imposte dell'emergenza sanitaria nei semestri precedenti.

ATTIVITA' SVOLTE	
AFFIDATARIO / COBENEFICIARIO	SINTESI DELLE ATTIVITÀ DI RICERCA SVOLTE, RISULTATI CONSEGUITI E RICADUTE SUL SETTORE PRODUTTIVO
ENEA	<p>Durante il 2° semestre del 2021 sono stati completati gli studi di ENEA sulla tematica riguardante lo sviluppo di fluidi termici avanzati per CSP.</p> <p>Per quanto riguarda le attività della L.A. 1.3, nel secondo semestre del 2021, sono stati presi in considerazione quattro diversi sali di miscele di nitrati e tre componenti puri; nei laboratori ENEA è stata realizzata una configurazione sperimentale, per testare ciascun sale nel tempo riscaldandolo a diversi valori di temperatura. Durante ciascuna prova, i sali sono stati campionati e analizzati per indagare la presenza di nitrati, e la formazione di ossidi; prima e al termine di ogni prova, sono state eseguite analisi per indagare gli effetti della stabilità termica sulle proprietà chimico-fisiche dei sali freschi e stressati. È stato inoltre implementato un modello cinetico semi-predittivo per spiegare il comportamento di degradazione di ciascun sale in ogni condizione</p>

temporale e termica. Dati i risultati emersi, è stato anche possibile utilizzare il modello sviluppato per stimare un tempo pratico di utilizzo di una miscela ad una determinata temperatura.

Per quanto riguarda la L.A. 1.4, nel secondo semestre del 2021 è stata proseguita l'attività sullo sviluppo e all'integrazione del database opesource. I dati ottenuti per le miscele binarie, ternarie e multicomponente ed i modelli sviluppati nelle precedenti linee di attività, hanno permesso anche di poter calcolare e mostrare le principali proprietà termofisiche di una miscela di nitrati e nitriti a partire dai singoli componenti, alla composizione molare ed alla temperatura desiderata. E' stata implementata anche la possibilità di inserire nuovi dati, a seconda del fluido termovettore che si sta considerando, rendendo questo database uno strumento "open" ed interattivo, che può essere ampliato e migliorato da ogni utente.

Riguardo la prosecuzione delle attività nell'ambito della L.A. 1.6 "Studi di compatibilità di nuove miscele di sali fusi con leghe metalliche in condizioni dinamiche", per studiare la cinetica di formazione dello strato di ossido sugli acciai sottoposti a test di corrosione, la variazione di peso del provino in funzione del tempo di permanenza nella miscela è stata valutata utilizzando apposite metodologie standardizzate. Alla fine di ciascuna delle due prove, le miscele di sali utilizzate sono state inoltre caratterizzate in termini di proprietà termofisiche e di composizione chimica, per valutare eventuali effetti di inquinamento sulle miscele a causa dei fenomeni corrosivi sui provini. terminate le prove di compatibilità di 1500 ore in condizioni dinamiche, i provini sono stati puliti secondo protocollo e, nell'ambito della linea LA1.8, sottoposti ad analisi metallografica (SEM/EDS/XRD) per lo studio degli strati superficiali di ossido formati, osservando l'eventuale presenza di fenomeni di pitting e di attacchi intergranulari.

Durante il 2° semestre del 2021, sono inoltre state portate avanti dall'ENEA le attività sulla messa a punto di un dispositivo di misura della conducibilità termica di fluidi termici (LA1.11). In particolare, è stata assemblata la cella di misura ed il circuito elettrico per l'alimentazione del cavo scaldante, si è reso necessario apportare delle modifiche strutturali che riguardano sia la cava di alloggiamento dell'elemento scaldante sia l'impiego di un cavo scaldante di sezione diversa da quella prevista dal progetto iniziale. Sono state effettuate delle prove sperimentali utilizzando come fluido un olio diatermico, il valore di conducibilità termica stimato dal modello (1) è apprezzabilmente più basso del valore reale. Alla luce di queste modifiche è necessaria una ulteriore verifica del modello adottato per la stima della conducibilità termica di fluidi alta temperatura.

Durante il 2° semestre del 2021 sono proseguiti gli studi di ENEA sulla tematica riguardante lo sviluppo di **NEPCM** sulla linea di attività LA1.16. In precedenza, uno scambiatore di calore, al cui interno un materiale nano-caricato è confinato in tre capsule, è stato caratterizzato attraverso prove di riscaldamento e raffreddamento. A partire dalle proprietà della formulazione SS_CATAS e dai risultati della caratterizzazione termica sperimentale effettuata, si è, quindi, analizzata, attraverso la metodologia CFD, una loro possibile applicazione ad un sistema di accumulo termocline ibrido (calore sensibile e latente), al fine di incrementarne la compattezza (aumento della densità di energia accumulata), la stabilità del livello termico in fase di scarica e l'efficienza termica. I risultati ottenuti mostrano come la presenza dei NEPCM, rispetto al caso in cui non siano presenti, alteri sensibilmente la storia termica della temperatura in uscita del fluido termovettore durante la fase di scarico del sistema. Infatti, il campo termico, nel momento in cui il termocline inizia a transitare nella zona dove sono presenti i NEPCM, rallenta la sua salita a causa del loro cambio di fase liquido/solido, trattenendo il termocline all'interno della zona dei NEPCM. La corretta scelta del materiale a cambiamento di fase è necessaria per ottimizzare la temperatura di uscita del sistema di accumulo termico, una tra le più stringenti richieste dell'utilizzatore finale del calore accumulato.

Oltre allo sviluppo di fluidi termici avanzati per CSP, nel 2° semestre del 2021 sono state finalizzate le attività di sviluppo di specifici componenti avanzati per CSP, tra cui tubi ricevitori e specchi.

Nel 2° semestre del 2020 sono state completate le attività di sviluppo di specifici componenti avanzati per CSP, tra cui tubi ricevitori e specchi.

Per quanto riguarda i **tubi ricevitori**, nel secondo 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), sono stati sviluppati rivestimenti per tubi ricevitori operanti in aria nell'intervallo di temperatura 300-500 °C.

Nell'ambito della linea di attività LA 1.18, durante la seconda annualità di progetto (2020), è stato dimostrato che i materiali studiati e realizzati per il rivestimento solare del tubo ricevitore operante in vuoto alla temperatura di 550 °C risultano idonei anche per la realizzazione di un rivestimento per un tubo ricevitore operante in aria alla temperatura di 300 °C. Pertanto, il rivestimento solare per tubi ricevitori solari operanti in vuoto alla temperatura di 550 °C, progettato e realizzato nel primo semestre 2021 nell'ambito della presente linea di attività LA1.19, è stato sottoposto a una serie di trattamenti termici in aria alla temperatura di 300 °C che ne hanno evidenziato proprietà molto interessanti sia in termini di efficienza fototermica ($\alpha_s=94.8\%$, $\epsilon_{th}=6.3\%$) che di stabilità ottica e strutturale.

Le attività progettuali previste sono state completate progettando e realizzando un rivestimento solare per un tubo ricevitore operante in aria alla temperatura di 500 °C. Detto rivestimento prevede un riflettore IR in WCrTi, un assorbitore solare costituito da un multistrato (7 strati) CERMET di WCrTi-Al₂O₃ e un antiriflesso costituito da uno strato di Al₂O₃ disposto sull'assorbitore. Il rivestimento solare realizzato presenta un'assorbanza solare pari a 94.11% e un'emissività termica, a 500 °C, pari a 19.25%. Lo studio sulla stabilità ottica e chimico-strutturale di questo rivestimento è stato condotto eseguendo una serie di trattamenti termici in aria a 500 °C. Dai test sperimentali è emerso che, a valle di un periodo di assestamento di circa 30 giorni, le proprietà ottiche e chimico-strutturali caratterizzanti il rivestimento tendono a stabilizzarsi portando all'ottenimento di un'assorbanza solare pari a 90.8% e di un'emissività termica pari a 18.1%.

Come previsto da Progetto, il nuovo rivestimento è stato utilizzato per realizzare un prototipo di coating per ricevitori solari operanti in aria alla temperatura massima di 500 °C, depositato su tubo di acciaio inossidabile (diametro esterno 70 mm, spessore di parete 2 mm e lunghezza 60 cm).

Per quanto riguarda gli **specchi**, durante il 2° semestre del 2021 sono stati completati gli studi di ENEA sulla tematica riguardante lo sviluppo di **rivestimenti per superfici riflettenti** per la messa a punto dei parametri di processo per depositare su larga area, attraverso la deposizione per sputtering reattivo, un film sottile di un politipode di nitrato di alluminio (a comportamento idrofobico) (secondo materiale individuato nel corso dell'attività di ricerca delle precedenti annualità) in sostituzione dell'ultimo layer di allumina, presente come strato a bagnabilità intermedia (amfifobico) esposto alle intemperie di uno specchio BSM. Tutti i campioni depositati in questa fase sono stati caratterizzati in termini di proprietà ottiche, morfologiche e bagnabilità. È stato realizzato un prototipo di rivestimento a ridotto consumo di acqua di lavaggio su uno specchio solare 10cm x 30 cm.

Durante il 2° semestre del 2021 sono stati completati gli studi di ENEA sulla tematica riguardante lo sviluppo di **sistemi di accumulo termico basati sull'utilizzo di zeoliti**. In particolare, nel corso del secondo semestre, è stato sperimentato un reattore a zeoliti di taglia significativa (circa 1 m³) accoppiato ad un campo solare del tipo Linear-Fresnel. L'attività sperimentale condotta ha permesso di analizzare sia le dinamiche di trasferimento del calore durante la fase di carica sia le dinamiche di rilascio del calore durante la fase di scarica, quest'ultima eseguita mediante l'impiego di un impianto in grado di simulare diversi profili di carico termico tipici di utenze civili e industriali. Dal confronto tra dati modellistici e risultati sperimentali è emerso un sostanziale accordo; ulteriori approfondimenti sono comunque necessari per adeguare il modello alla fenomenologia evidenziata durante l'esecuzione dei diversi cicli di carica/scarica del reattore a zeoliti. Infine la sperimentazione, pur fornendo risultati interessanti, ha evidenziato alcune criticità legate alla gestione operativa e alle caratteristiche costruttive del sistema implementato che, se migliorati, consentiranno di incrementare sensibilmente le performance del reattore sperimentato.

Oltre allo sviluppo di materiali e componenti innovativi per CSP, nel 2° semestre del 2021 sono state completate le attività di ENEA sull'integrazione della tecnologia del Solare Termodinamico nel sistema energetico Nazionale.

In particolare, nel 2° semestre del 2021 è stata completata da parte di ENEA la realizzazione dell'impianto sperimentale ENEA-SHIP ed è stato effettuato il commissioning e la messa in

	<p>esercizio dell'infrastruttura. In una prima fase operativa è stata verificata la funzionalità dei singoli sottosistemi installati (campo solare, riscaldatore elettrico, aerotermi e pompa). In una seconda fase operativa il circuito è stato messo in opera in assenza di focalizzazione, al fine di verificare il corretto funzionamento dell'apparato di acquisizione e controllo. Attraverso tali prove, inoltre, è stata calcolata la potenza del campo solare dispersa verso l'ambiente. In una terza fase operativa l'impianto è stato testato "on-sun". Dalle misure sul campo, per ciascun test svolto, è stata ricavata la prevalenza della pompa di ricircolo, la potenza termica e l'incremento di temperatura ottenuti dal campo solare, la potenza netta fornita dal riscaldatore al buffer, le potenze scambiate dai due aerotermi, le dispersioni delle tubazioni, e il rendimento globale del collettore. Dal confronto tra le prestazioni misurate e quelle stimate attraverso un modello previsionale appositamente sviluppato, emerge uno scostamento tra dati teorici e sperimentali: il rendimento globale misurato del campo solare è risultato inferiore dell'80-90% rispetto a quello atteso. Ciò è sostanzialmente indice di una qualità ottica del sistema sperimentale non ottimale, condizionata da diversi fattori, quali la riflettanza e la curvatura non corretta degli specchi primari, problemi di forma del riflettore secondario, l'errore di allineamento e di inseguimento degli specchi. A questo riguardo, il fornitore in fase di rilascio dell'impianto ha previsto una sostituzione totale degli specchi dell'ottica primaria dei collettori.</p> <p>Nel futuro sarà pertanto necessario disinstallare e reinstallare alcuni moduli riflettenti per migliorare la prestazione ottica dell'attuale collettore. Infine, allo scopo di sperimentare i nuovi fluidi termovettori individuati nell'ambito delle parallele attività di ricerca del PTR 2019-2021 (nuove miscele ternarie e quaternarie di sali fusi), maggiormente eco-compatibili e stabili a più alte temperature rispetto agli oli diatermici, sono state individuate e proposte delle azioni di revisione progettuale del circuito, quali l'installazione di un sistema di tracciamento elettrico per la protezione delle tubazioni dal congelamento delle miscele di sali fusi. Ciò consentirà di estendere il campo di applicazione della tecnologia CST ai processi del settore industriale "hard to abate" (a medio/alta temperatura) e di arricchire il portafoglio delle soluzioni tecniche rese disponibili per l'industria.</p> <p>Infine, nel 2° semestre del 2021 sono stati completati gli studi di ENEA sulla tematica riguardante lo sviluppo di la caratterizzazione meteorologica sulla linea di attività riguardante lo sviluppo di modelli di previsione a breve termine della radiazione solare.</p> <p>Si è calcolata la previsione della radiazione diretta normale per le successive 48 ore per l'intero anno 2020, per il sito della Casaccia, seguendo due strade:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Prendere tal quale la previsione della radiazione solare diretta normale calcolata dal modello fisico di previsione meteorologica WRF-ARW; 2) Prendere come output del modello meteorologico alcuni parametri come la copertura nuvolosa, temperatura e umidità relativa e attraverso il modello locale sviluppato in un'altra linea di attività per il calcolo della previsione della radiazione solare globale orizzontale e il modello sviluppato nel primo semestre calcolare la previsione della radiazione solare diretta normale. <p>Si è fatto un confronto dei due metodi utilizzati con la radiazione acquisita al suolo.</p>
<p>Università degli Studi di Roma "Tor Vergata"</p>	<p>Durante il 2° semestre del 2021, l'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata" ha proseguito la sua attività di caratterizzazione sulle diverse tipologie di acciai sottoposti a prove di compatibilità con miscele di sali fusi in condizioni dinamiche descritte nella L.A. 1.6.</p> <p>Proseguendo con le modalità già descritte nel primo semestre 2021 della LA1.8, mediante le analisi di microscopia elettronica (SEM) sono stati evidenziati i fenomeni di corrosione eventualmente occorsi e, attraverso l'analisi EDX ed XRD è stato studiato lo spessore e la composizione degli strati ossidati.</p> <p>I risultati ottenuti hanno evidenziato la formazione di fessure nel campione di carbon steel, specialmente in presenza di calcio nitrato. Inoltre, i fenomeni di ossidazione hanno generalmente seguito una cinetica non lineare, con una velocità relativamente alta nelle prime 400-500 ore seguita da piccole variazioni nello spessore dello strato di descaling, rendendo così più difficoltosa un'appropriata modellazione matematica di questo comportamento.</p>

<p>Università “La Sapienza”</p> <p>Dip. Ing. Chimica, Materiali, Ambiente</p>	<p>Durante il 2° semestre del 2021, il Dip. Ing. Chimica, Materiali, Ambiente dell’Università “La Sapienza” ha analizzato i risultati dell’analisi computazionale del meso-dispositivo ed anche l’accuratezza delle previsioni del modello unidimensionale relativamente alla misura della conducibilità termica di fluidi termici ad elevata temperatura.</p>
<p>Università di Perugia</p> <p>Dip. Ing. Civile e Ambientale</p>	<p>Nel 2° semestre del 2021, il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell’Università di Perugia ha proseguito le attività del 1° semestre del 2021. In particolare, materiali prodotti sono stati sottoposti a caratterizzazione delle proprietà termiche e delle caratteristiche morfologiche. I NEPCM hanno mostrato una o più caratteristiche migliorate rispetto ai materiali attualmente in uso nei CSP. Alcuni risultati sono stati particolarmente incoraggianti con consistenti miglioramenti di alcune proprietà di primaria importanza. I test hanno dimostrato che si ottengono sensibili incrementi del calore specifico medio (>+50%) nel range termico di applicazione. Un aumento del calore specifico corrisponde ad un incremento della capacità termica e della densità di energia catturata e, nel caso di utilizzo come HTF, ad un miglioramento del trasporto di energia. In conclusione, molti dei PCM modificati con nanoparticelle hanno prodotto un miglioramento delle proprietà termiche rispetto ai PCM di base. In particolare, la miscela di nanoparticelle di ossido di silicio ed ossido di alluminio, le strutture metallorganiche MOF denominate MIL53 e le nanosfere di lega metallica rame/stagno hanno fornito i migliori risultati complessivi tra tutti NEPCM prodotti. I PCM modificati con C84, MIL53 e B12 hanno soddisfatto tutte le specifiche richieste in termini di densità di energia catturata, miglioramento del trasporto di energia, riduzione del costo, riduzione dell’impatto ambientale, riduzione delle perdite di calore, stabilità e sicurezza.</p>
<p>Politecnico di Torino</p> <p>Dip. Energia</p>	<p>Durante il 2° semestre del 2021 sono stati completati 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.</p> <p>Per quanto riguarda l’attività di “analisi delle prestazioni termiche di ricevitori con coating selettivi a bassa emissività in aria” (LA1.21), nel 2° semestre del 2021 il Politecnico di Torino ha implementato le correlazioni per le perdite convettive ottenute nel corso del precedente semestre in un modello a parametri concentrati. Tale modello si basa su quello sviluppato nel corso dell’attività LA 1.20, ma opportunamente modificato per simulare anche il caso dei collettori lineari di tipo Fresnel. Il modello a parametri concentrati viene utilizzato per confrontare le due tecnologie in termini di rendimento termico, considerando un rivestimento selettivo stabile in aria per il tubo non evacuato e due rivestimenti selettivi stabili in vuoto per il tubo evacuato, uno performante alle basse temperature e uno alle alte temperature. I risultati indicano che la tecnologia del tubo evacuato ha un rendimento più alto a prescindere dal rivestimento selettivo applicato. Si tratta di un risultato atteso a causa dell’isolamento termico offerto dall’intercapedine evacuata. La temperatura ambiente influenza in modo trascurabile le prestazioni termiche, mentre la velocità del vento comporta una variazione apprezzabile del rendimento termico solo nel caso del tubo non evacuato in cui si ha un debole disaccoppiamento termico tra tubo assorbitore e tubo di vetro. Si è poi svolta una analisi termo-economica al variare della potenza termica incidente. I risultati indicano che la tecnologia del tubo evacuato è sempre più conveniente, sebbene ad alti flussi termici il costo di investimento per l’intera linea i collettori sia comparabile.</p> <p>Riguardo l’attività “analisi termo-fluidodinamica del sistema di stoccaggio di energia solare termocline a sali fusi per CSP a singolo scambiatore rinforzato con sistemi a PCM” (LA1.30), nel corso del 2° semestre del 2021 il Politecnico di Torino ha modificato il modello CFD sviluppato nel corso dell’attività LA1.29 per includere la presenza degli inserti di PCM, costituiti da un banco tubiero di tubi toroidali riempiti con il materiale a cambiamento di fase. Al fine di mantenere un costo di calcolo accettabile, il dominio computazionale del modello CFD non include le pareti dei tubi e il PCM, che vengono sostituite da una condizione al contorno di tipo Robin governata da un modello a parametri concentrati accoppiato al modello CFD. Il modello risultante viene impiegato per simulare un transitorio di carica e i risultati vengono confrontati con quelli del sistema di accumulo privo degli inserti di PCM. Si ottiene che il materiale a cambiamento di fase permette</p>

	di stabilizzare la temperatura dei sali nella parte superiore del serbatoio, determinando anche una separazione più netta tra i sali caldi e il resto del termoclino.
<p>Università di Palermo</p> <p>Dip. Ing.</p> <p>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 2° Semestre del 2021 è stata completata l'attività di valutazione delle strategie di accoppiamento dei processi chimici selezionati nel corso della LA1.34 con impianti solari a concentrazione al fine di individuare le più efficaci. Tale valutazione ha condotto all'elaborazione di studi di fattibilità e schemi dettagliati di processo che potranno successivamente essere utilizzati come base per la realizzazione di futuri progetti dimostrativi.</p>
<p>Politecnico di Milano</p> <p>Dip. Energia</p>	<p>Nel 2° 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 applicato la metodologia di ottimizzazione sviluppata nel primo semestre a quattro differenti impianti ibridi CSP/PV caratterizzati da diverse sezioni CSP: i) impianto di taglia medio-grande (10-100MW) con collettori parabolico-lineari a olio diatermico e ciclo Rankine a vapore d'acqua, ii) impianto di taglia medio-grande (10-100MW) con collettori Fresnel a sali fusi e ciclo Rankine a vapore d'acqua, iii) impianto di taglia medio-piccola (2-10MW) con collettori Fresnel a sali fusi ciclo Rankine a vapore d'acqua (senza RH), iv) impianto di taglia piccola (1 MWe) ad olio diatermico, collettori lineari Fresnel e ciclo Rankine con fluido di lavoro organico (ORC). Ciascuno dei 4 casi è stato ottimizzato tramite ottimizzatore MILP considerando due differenti scenari caratterizzati da un profilo differente di domanda elettrica (costante e variabile). Per il caso di taglia piccola con blocco di potenza a fluido organico è stata infine effettuata un'analisi della migliore configurazione di impianto ibrido al variare del livello di dispacciabilità richiesto all'impianto.</p>