

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. 2 – Periodo attività: 01/07/2019 – 31/12/2019

ABSTRACT ATTIVITA' SEMESTRALE:

L'attività di ricerca svolta nel secondo semestre del 2019, nell'ambito del progetto 1.9 "Solare Termodinamico", ha permesso all'ENEA di proseguire e terminare le linee di attività avviate nel primo semestre all'interno delle macro-tematiche su cui è strutturato il progetto.

In particolare, sono proseguite le attività di sviluppo di materiali e componenti innovativi, tra cui: fluidi termici, tubi ricevitori, superfici riflettenti, sistemi di accumulo termico. Oltre allo sviluppo di materiali e componenti innovativi, in questo secondo semestre del 2019 è stata sviluppata e validata una metodologia di analisi di collettori solari. Sono stati inoltre portati a termine gli studi preliminari sull'integrazione di sistema, riguardanti l'introduzione della tecnologia 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 infine proseguiti gli studi di caratterizzazione e previsione meteo-climatica, per la validazione di metodologie utili all'analisi delle prestazioni e alla conduzione d'impianti solari a concentrazione.

I risultati conseguiti nel secondo semestre del 2019 hanno permesso di terminare alcune linee di attività del progetto. I risultati conseguiti costituiscono input per la realizzazione di nuove linee di attività previste per il 2020 all'interno delle rispettive macro-tematiche.

ATTIVITA' SVOLTE	
AFFIDATARIO / COBENEFICIARIO	SINTESI DELLE ATTIVITÀ DI RICERCA SVOLTE, RISULTATI CONSEGUITI E RICADUTE SUL SETTORE PRODUTTIVO
ENEA	Durante il 2° semestre del 2019, sulla tematica dello sviluppo di fluidi termici avanzati per CSP , sono proseguite e terminate gli studi sulle miscele di sali fusi bassofondenti e sui fluidi additivati con nanoparticelle. Per quanto riguarda la "selezione modelli termodinamici predittivi per nuove miscele bassofondenti di sali fusi" (LA1.1), l'attività di modellazione ha richiesto lo sviluppo di un codice di calcolo per minimizzare i sistemi di equazioni relativi ai diagrammi di fase. È stato definito un metodo di approssimazione che può essere implementato con le espressioni dell'energia libera di eccesso. Successivamente il modello è stato validato simulando tre diversi sistemi ternari d'interesse scientifico e applicativo per il CSP: K/Na/Li//NO ₃ , Na/K//NO ₃ /NO ₂ e Na/K/Ca//NO ₃ . La validità della modellazione è stata confermata confrontando i risultati teorici ottenuti con i

dati sperimentali già disponibili: i modelli implementati per i primi due sistemi ternari (additivo e reciproco) descrivono bene i dati sperimentali; per il terzo sistema ternario, sebbene la corrispondenza tra dati calcolati e sperimentali sia risultata minore, l'andamento dei diagrammi di fase è stato replicato in modo soddisfacente.

Per quanto riguarda la "selezione e caratterizzazione di sali e nano-particelle per materiali a proprietà termiche incrementate" (LA1.12) nel secondo semestre 2019 è stata identificata una serie di sali e nanoparticelle, sui quali si è approfondita l'analisi delle principali proprietà, identificando inoltre i metodi di sintesi che garantiscano una diretta scalabilità dei processi e una rapida industrializzazione. Le proprietà termofisiche dei sali selezionati in questa prima annualità saranno successivamente migliorate attraverso l'uso di opportune nanoparticelle per realizzare nuovi nanofluidi o materiali a cambiamento di fase a proprietà incrementate (NEPCM). I risultati conseguiti nella LA1.12, in termini di selezione dei materiali e dei processi d'interesse per la produzione di NEPCM per il trasferimento e l'accumulo di calore in impianti CSP, forniranno le indicazioni per la successiva attività di sintesi e caratterizzazione sperimentale di innovativi nanofluidi che sarà svolta in collaborazione con l'Università di Perugia nel biennio 2020-2021.

Oltre allo sviluppo di fluidi termici avanzati per CSP, nel 2° semestre del 2019 sono proseguite le attività di sviluppo di specifici componenti avanzati per CSP: tubi ricevitori, specchi e sistemi di accumulo di calore.

Per quanto riguarda i **tubi ricevitori**, sono stati sviluppati "materiali per coating innovativi a base di tungsteno e allumina ad alta stabilità in vuoto" (LA1.17), con lo studio di processi per la realizzazione di materiali nanocompositi ceramico-metallici (CERMET) a base di allumina e tungsteno ($W-Al_2O_3$) con stabilità incrementata rispetto ai CERMET a doppio nitrato. Tali materiali dovevano essere idonei all'applicazione in tubi ricevitori solari evacuati operativi alla temperatura di 550°C. L'attività, condotta nel 1° semestre 2019 sull'allumina è risultata propedeutica per l'attività, condotta nel 2° semestre 2019, rivolta alla realizzazione di materiali CERMET a base di $W-Al_2O_3$ da impiegarsi come assorbitori nel rivestimento solare del tubo ricevitore. Tali materiali sono stati realizzati mediante il co-sputtering reattivo con simultanea deposizione della componente ceramica e di quella metallica del CERMET. La realizzazione dei materiali CERMET a base di $W-Al_2O_3$ è avvenuta mediante la messa a punto di processi di co-sputtering reattivo in regime di transizione, da target di W e di Al. I processi di deposizione sono risultati ripetibili, veloci, a basso costo e implementabili su impianti industriali. Infine, i materiali realizzati sono stati sottoposti a trattamenti termici in vuoto a 600°C per una durata complessiva di 132 giorni per valutare la loro stabilità ottica e strutturale. I risultati della sperimentazione hanno dimostrato che i CERMET $W-Al_2O_3$, realizzati con processi veloci di deposizione, possono essere utilizzati come strati assorbitori nei rivestimenti solari per tubi ricevitori evacuati operanti fino a 550°C.

Per quanto riguarda gli **specchi**, nel 2° semestre del 2019 è proseguito lo "studio di tecniche per modifica delle proprietà di superficie del vetro per specchi autopulenti" (LA1.22). Il lavoro svolto nel corso del semestre rappresenta l'esplorazione critica (corredata di verifica sperimentale preliminare e ottimizzazione di materiali e metodi) delle possibilità di intervenire efficacemente sull'abbattimento del costo di manutenzione degli specchi solari attraverso la deposizione di rivestimenti autopulenti mirati, senza intaccare le proprietà ottiche richieste a uno specchio solare, ma cercando di preservarne e ottimizzarne le prestazioni in esercizio. In particolare, tra le soluzioni individuate sono state selezionate quelle più facilmente implementabili nelle esistenti linee di fabbricazione degli specchi. Entrando nello specifico dei materiali che sono stati scelti e realizzati in via esplorativa, l'approccio ritenuto scientificamente più promettente riguarda la modifica del gap del biossido di titanio attraverso un opportuno drogaggio, in modo da poterne sfruttare le proprietà super-idrofile e fotocatalitiche non soltanto con la luce UV ma anche con parte dello spettro visibile. La sperimentazione successiva sarà volta a modulare gap e indice di rifrazione dei materiali ottenuti sia per sputtering sia per SOL-GEL. Come rivestimenti idrofobici sono stati scelti i polisilsesquiosani, un'interessante classe di polimeri ibridi organico-inorganici, che contengono gabbie silicee di geometria poliedrica e quindi sono intrinsecamente nanostrutturati nel bulk e non solo in superficie, essendo anche trasparenti nel range visibile. Queste matrici polimeriche potrebbero essere adoperate anche per creare schermi elettrodinamici, previa introduzione di guest conduttivi, in modo da agire sul minore accumulo

di polvere e quindi sulla riduzione dello sporcamento.

Per quanto riguarda i **sistemi di accumulo termico per CSP**, nel 2° semestre 2019 è proseguita l'attività di "ottimizzazione di un sistema di accumulo termico termocline a sali fusi a doppio scambiatore" (LA1.27), con l'analisi dei risultati sperimentali ottenuti su un prototipo di sistema di stoccaggio di energia termica (Thermal Energy Storage, TES) installato presso centro ricerche ENEA-Casaccia: si tratta di una tecnologia TES innovativa, basata su un singolo serbatoio dal quale si estrae il calore sensibile di una miscela di sali fusi ternaria in esso contenuta; il serbatoio è integrato con due scambiatori di calore (con geometria studiata e brevettata dall'ENEA) per le operazioni di carica e scarica, posizionati in modo tale da avere una stratificazione del sale fuso al suo interno. Nel 2° semestre del 2019 i dati sperimentali sono stati elaborati e confrontati con i risultati del modello. Le simulazioni numeriche hanno confermato qualitativamente l'evidenza sperimentale della formazione di un termocline all'interno della massa di sale contenuta nel serbatoio. Si è osservato che un'elevata portata di sale all'interno dello scambiatore e camino e quindi nel serbatoio comporta un'elevata velocità del fronte freddo del termocline, riducendo notevolmente i tempi di scarica. I risultati suggeriscono che per prolungare i tempi di carica e scarica occorre apportare alcune modifiche all'interno del serbatoio in prossimità degli scambiatori, cioè dei dispositivi con la funzione di far variare le perdite di carico del sale e quindi regolarne la portata.

Nel 2° semestre del 2019 è stata inoltre svolta una specifica attività di "**analisi di ricevitori ottimizzati** per sistemi di piccola taglia a media temperatura" (LA1.25). In particolare, è stato realizzato uno strumento in grado di valutare e ottimizzare concentratori a media temperatura caratterizzati da geometrie innovative che permettano di ottenere performance migliori rispetto a configurazioni standardizzate attualmente presenti sul mercato. In primo luogo sono state selezionate le configurazioni dei ricevitori potenzialmente in grado di fornire prestazioni migliori rispetto ai ricevitori convenzionali. In secondo luogo, è stata realizzata un'analisi ottica mediante il software di ray-tracing TracePro e un'analisi termo-fluidodinamica mediante il software agli elementi finiti Comsol e script di MatLab. I risultati ottenuti sono stati analizzati ai fini dell'ottimizzazione dei ricevitori. Riguardo la scelta dei concentratori innovativi sono state selezionate due tipologie di ricevitori non evacuati da analizzare e confrontare, sia tra loro sia con un concentratore di riferimento. L'analisi di ray-tracing ha consentito di valutare ed ottimizzare dal punto di vista ottico le due configurazioni di ricevitori esaminate. Le successive simulazioni termo-fluidodinamiche hanno consentito di analizzare il comportamento termico e fluidodinamico dei due ricevitori esaminati permettendo di determinare il campo di velocità nell'aria e la distribuzione di temperatura nei vari domini. Si è infine effettuata una comparazione in termini di rese termiche e curve di efficienza tra i due concentratori innovativi e il concentratore di riferimento che ha permesso di quantificare gli aspetti migliorativi introdotti che si sono attestati su scarti compresi tra 6% e 11%. I risultati ottenuti hanno fornito utili indicazioni sulle possibili scelte costruttive da implementare in funzione delle temperature operative dei ricevitori.

Nel 2° semestre del 2019 sono inoltre proseguite le attività riguardanti l'applicazione della tecnologia CSP per la fornitura di **calore di processo per applicazioni industriali**, con l'"analisi delle tecnologie solari a concentrazione potenzialmente idonee a diversi livelli termici" (LA1.32). In particolare, nel 2° semestre del 2019 sono state identificate possibili combinazioni tra i diversi sottosistemi ed elementi di impianti solari termici a concentrazione (CST, collettori solari, fluidi termovettori, unità di accumulo di energia termica, interfaccia con l'utenza industriale, ecc.) e i processi endotermici di maggiore interesse. In particolare, per ciascun processo industriale, sono stati elaborati schemi concettuali di integrazione con il CST, 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 basso-fondenti per temperature medie, iii) miscele di sali fusi tipo "Solar Salt" per applicazioni ad alta temperatura. Gli schemi di integrazione sviluppati nell'ambito di questa Linea di Attività, in cui sono proposte anche specifiche tecnologie di accumulo termico, saranno oggetto di futuro approfondimento ed analisi, al fine di valutare i costi associati all'alimentazione termica solare di processi endotermici significativi e rappresentativi del tessuto produttivo nazionale.

Sempre nell'ambito dell'integrazione della tecnologia CSP nel tessuto energetico nazionale, nel 2° semestre del 2019 sono proseguiti gli studi sull'"analisi e individuazione di configurazione di **impianti ibridi CSP/PV**" (LA1.38). La metodologia di analisi di impianti ibridi CSP/PV sviluppata nel 1° semestre è stata validata considerando qualche caso studio di interesse applicativo. Inoltre, sulla base del modello generale proposto, sono state infine individuate tre configurazioni d'impianti ibridi CSP/PV caratterizzate da diverse taglie d'interesse Nazionale: impianti ibridi medio-grandi (40-50 MW), medio-piccoli (5 MW) e piccoli (1 MW). Tali configurazioni d'impianti saranno pertanto oggetto dell'analisi tecnico-economica, mediante appositi modelli, realizzata nelle annualità successive dall'ENEA con il Politecnico di Milano.

Infine, nel 2° semestre del 2019 sono proseguite le attività di ricerca sulla "**caratterizzazione meteoclimatica** dei siti" (LA1.42) con un'estensiva analisi della radiazione solare utile alla gestione e controllo di impianti CSP. La disponibilità dei dati di misura della radiazione solare ha reso possibile i confronti con le stime della radiazione solare (GHI e DNI) ricavabili dalle immagini satellitari di copertura nuvolosa grazie all'applicazione di modelli sviluppati in ENEA. Il confronto con le misure è stato effettuato con i dati orari estratti dalle mappe registrate nella località del sito ENEA-Casaccia (Roma) per tutto il periodo dal 2006 al 2015. Il confronto fra misure e stime ha provato che queste ultime costituiscono uno strumento sufficientemente accurato per la valutazione del potenziale radiativo solare al suolo. Si è pertanto provveduto a redigere "anno meteorologico tipico" (AMT) per il sito ENEA-Casaccia con le irradianze globale e diretta ricavate da fonte satellitare grazie ai modelli ENEA. Mentre nel 1° semestre 2019 sono stati elaborati i dati acquisiti dalle centraline, nel 2° semestre 2019 sono state elaborate le immagini satellitari ed è stato implementato il modello.