



Ricerca di Sistema elettrico

Verifica della funzionalità dei sottosistemi e caratterizzazione sperimentale dell'impianto solare a concentrazione a servizio del calore di processo

M. D'Auria, R. Grena, M. Lanchi, P. Di Ascenzi, G. Petroni, V. Russo,
P. Pagano, W. Gaggioli

VERIFICA DELLA FUNZIONALITÀ DEI SOTTOSISTEMI E CARATTERIZZAZIONE SPERIMENTALE DELL'IMPIANTO SOLARE A CONCENTRAZIONE A SERVIZIO DEL CALORE DI PROCESSO

M. D'Auria, R. Grena, M. Lanchi, P. Di Ascenzi, G. Petroni, V. Russo, P. Pagano, W. Gaggioli (ENEA)

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero della Transizione Ecologica - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità 2021

Obiettivo: *Sistema Elettrico o Tecnologie*

Progetto: 1.9 Solare termodinamico

Linea di attività: LA1.37 - Calore di processo per applicazioni industriali: realizzazione e messa in esercizio di un impianto sperimentale dedicato presso il C.R. ENEA-Casaccia

Responsabile del Progetto: ing. Alberto Giaconia, ENEA

Indice

SOMMARIO	4
1 INTRODUZIONE	6
2 IMPIANTO SPERIMENTALE	8
2.1 AREA DI INSTALLAZIONE	8
2.2 CAMPO SOLARE	10
2.3 RISCALDATORE ELETTRICO	12
2.4 AEROTERMI.....	14
2.5 SISTEMA DI ACQUISIZIONE DATI	15
2.5.1 <i>Sistema DCS</i>	16
2.5.2 <i>Parti strumentali</i>	17
2.5.3 <i>Misure di temperatura</i>	18
2.5.4 <i>Misure di pressione</i>	19
2.5.5 <i>Misure di portata</i>	19
2.5.6 <i>Indicatori locali</i>	19
2.5.7 <i>Sicurezze</i>	19
3 PROCEDURE	20
3.1 PROCEDURA DI CARICAMENTO OLIO	22
3.2 PROCEDURA DI PRIMO AVVIAMENTO A FREDDO (CON OLIO AD ALMENO 20 °C)	23
3.3 PROCEDURA DI PRIMO AVVIAMENTO A CALDO	23
3.4 PROCEDURA DI NORMALE AVVIAMENTO.....	24
3.5 PROCEDURA DI FERMATA E SPEGNIMENTO.....	25
3.6 PROCEDURA DI SVUOTAMENTO	25
4 MODELLO PREVISIONALE DEL CAMPO SOLARE	27
5 PROVE SPERIMENTALI	35
5.1 FUNZIONALITÀ SOTTOSISTEMI	35
5.2 PROVE IN ASSENZA DI FOCALIZZAZIONE	39
5.3 PROVE IN FOCALIZZAZIONE	46
6 POSSIBILI AZIONI DI OTTIMIZZAZIONE E REVISIONE PROGETTUALE	57
6.1 REVAMPING DEL SISTEMA PER NUOVI FLUIDI TERMOVETTORI.....	58
7 CONCLUSIONI.....	60
8 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	62

Sommario

Nell'ambito del presente Report sono descritti i lavori di realizzazione, installazione, commissioning ed esercizio della piattaforma sperimentale ENEA-SHIP, la cui progettazione è stata effettuata nella precedente annualità (LA1.36). Tale piattaforma è funzionale allo studio di soluzioni tecniche per la produzione di calore di processo a medio/alta temperatura (200-550 °C) da impianti solari a concentrazione (CST). Coerentemente a quanto inizialmente previsto, l'attuale configurazione dell'impianto ENEA-SHIP si basa principalmente sull'utilizzo di componenti e fluidi termovettori commerciali, largamente impiegati nel settore industriale, al fine di valutarne la loro potenziale applicazione nell'ambito della tecnologia CST, in un'ottica di riduzione dei costi e immediato trasferimento all'industria. In particolare, la nuova piattaforma sperimentale è principalmente costituita da una linea di collettori lineari del tipo Fresnel sperimentale, integrata con due aerotermini, che simulano l'utenza industriale, e con un riscaldatore elettrico, che simula una prima sezione del campo solare. Il circuito è inoltre dotato di buffer di accumulo, vaso di espansione e pompa di circolazione, ed è strumentato con rilevatori di temperatura, pressione e portata (olio e aria) per il controllo in remoto delle attività sperimentali. I collettori lineari sperimentali Fresnel installati sono già predisposti per poter essere impiegati per la caratterizzazione di nuove miscele ternarie e quaternarie di sali fusi.

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. Inoltre, la messa in esercizio della piattaforma ha incontrato le tipiche difficoltà associate al commissioning dei sistemi sperimentali.

In una prima fase operativa, i test sperimentali sono stati finalizzati alla verifica della funzionalità dei singoli sottosistemi (campo solare, riscaldatore elettrico, aerotermini e pompa) e alla risoluzione delle problematiche riscontrate nell'installazione dei componenti. Per il riscaldatore elettrico, la messa in marcia ha seguito procedure standard e non ha richiesto particolari accorgimenti, anche se durante le prove sono state rilevate perdite termiche non trascurabili (pari a circa 20 kW) dovute ad una coibentazione poco efficace, che dovrà essere migliorata. Per gli aerotermini, le prove di funzionalità hanno confermato la rispondenza tra le prestazioni effettive e quelle attese, mentre per la pompa di ricircolo è stata rilevata una difformità tra la prevalenza fornita e i dati di targa, comportando una riduzione della portata massima di olio che oscilla dal 3 all'8%.

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. Durante tali prove è stata variata la portata del fluido termovettore (0.80, 1.05, 1.33, 1.60, 1.85 e 2.23 kg/s) e la potenza dell'aerotermino che simula l'utenza, mantenendo fissa la temperatura del fluido termovettore in ingresso all'aerotermino stesso. Ciò ha consentito di verificare la controllabilità del circuito. 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", variando le condizioni operative in modo da garantire una temperatura del fluido termovettore in ingresso al campo solare pari a 290 °C. Le prove sono state effettuate con portata del fluido impostata su due valori (1.30 e 2.15 kg/s) e a differenti regolazioni dell'inverter sull'aerotermino AE1. 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 aerotermini, 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 non trascurabile tra dati teorici e sperimentali: il rendimento globale misurato del campo solare è inferiore dell'80-90% rispetto a quello atteso. Ciò è sostanzialmente indice di una limitata qualità ottica del sistema sperimentale, 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. Il fornitore in fase di rilascio dell'impianto ha previsto una sostituzione totale degli specchi dell'ottica primaria dei collettori.

Nel futuro sarà pertanto necessario disinstallare e reinstallare alcuni moduli riflettenti per migliorare la prestazione ottica dell'attuale collettore, mentre, in vista di possibili applicazioni commerciali della tecnologia SHIP, andrà valutato, caso per caso, il vantaggio derivante dalla movimentazione autonoma di ciascuna fila di specchi a fronte di una maggiore complessità nella fase di commissioning e nel normale esercizio di impianto.

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, nel futuro si prevede di modificare il circuito attraverso l'installazione di un sistema di tracciamento elettrico per la protezione delle tubazioni dal congelamento delle miscele di sali fusi, la cui temperatura di fusione varia da 150 a 240°C, dipendentemente dalla composizione della miscela. 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.

1 Introduzione

In Italia l'industria assorbe oltre il 40% della domanda nazionale di energia termica [1] e ha un peso significativo, sia sui consumi globali che sulle emissioni di anidride carbonica, che gli impegni internazionali e il New Green Deal impongono di ridurre significativamente nei prossimi anni, in linea con il target della neutralità climatica entro il 2050.

In tale contesto, la tecnologia del solare a concentrazione, che può generare calore a medio/alta temperatura on-demand, rappresenta una valida soluzione per ridurre l'utilizzo di combustibili fossili e favorire la transizione ecologica del settore industriale grazie a una progressiva decarbonizzazione dei processi produttivi.

Sulla base di studi internazionali [2-3], circa il 90% dell'energia termica consumata dall'industria a livello mondiale è attualmente prodotta da fonti fossili (45% carbone, 30% gas naturale e 15% petrolio) e non più del 10% da fonti rinnovabili. Circa la metà di questi consumi è associata a processi a medio/alta temperatura, definiti "hard-to-abate" perché difficilmente elettrificabili, per i quali il solare a concentrazione può fornire soluzioni efficaci per la decarbonizzazione.

Tuttavia, pur potendo garantire produzione affidabile e flessibile di calore, grazie all'accumulo termico, il solare a concentrazione deve adattare la propria offerta tecnologica ad un mercato eterogeneo, con diverse temperature e modalità di funzionamento dei processi, differenti carichi termici e taglie di impianto; la sfida risiede, pertanto, nello sviluppo di soluzioni modulari, versatili, e facilmente integrabili ai processi industriali già esistenti. Al fine di supportare lo sviluppo della tecnologia e favorire la capillare decarbonizzazione del settore industriale, nell'ambito del Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 della Ricerca di Sistema Elettrico, è stata progettata, realizzata e testata una piattaforma sperimentale a collettori lineari Fresnel dedicata allo studio, sperimentazione e validazione di nuove soluzioni tecniche e configurazioni di impianto per la fornitura di calore alle utenze industriali.

Il nuovo impianto, denominato ENEA-SHIP, il cui schema concettuale è riportato in Figura 1, è una piattaforma sperimentale di dimensioni reali finalizzata a testare materiali e componenti innovativi, principalmente costituita da una linea di collettori lineari Fresnel, della lunghezza di 36 m. La superficie riflettente, costituita da 425 specchi (625 mm x 1250 mm), suddivisi in 17 file movimentabili separatamente, ha un'estensione di 332 m² circa. L'attuale temperatura massima del fluido termovettore (Therminol 66) è pari 320°C e la potenza termica nominale di picco dell'impianto è pari a circa 190 kW. L'impianto è inoltre costituito da i) Riscaldatore elettrico (CE), funzionale al preriscaldamento dell'olio diatermico; ii) Buffer (BU), piccolo serbatoio di accumulo asservito al funzionamento e al controllo della caldaia elettrica e componente di interfaccia tra il circuito primario e secondario dell'impianto; iii) Aerotermo 1 (AE1), scambiatore di processo olio-aria, che simula specifiche utenze, soprattutto in termini di temperature operative; iv) Aerotermo 2 (AE2), scambiatore di servizio olio-aria, funzionale al controllo della temperatura dell'olio in ingresso al campo solare; v) Vaso di espansione (VE) pressurizzato con linea di azoto (circa 6 atm); vi) pompa centrifuga di rilancio (P), per la circolazione dell'olio diatermico nell'impianto sperimentale.

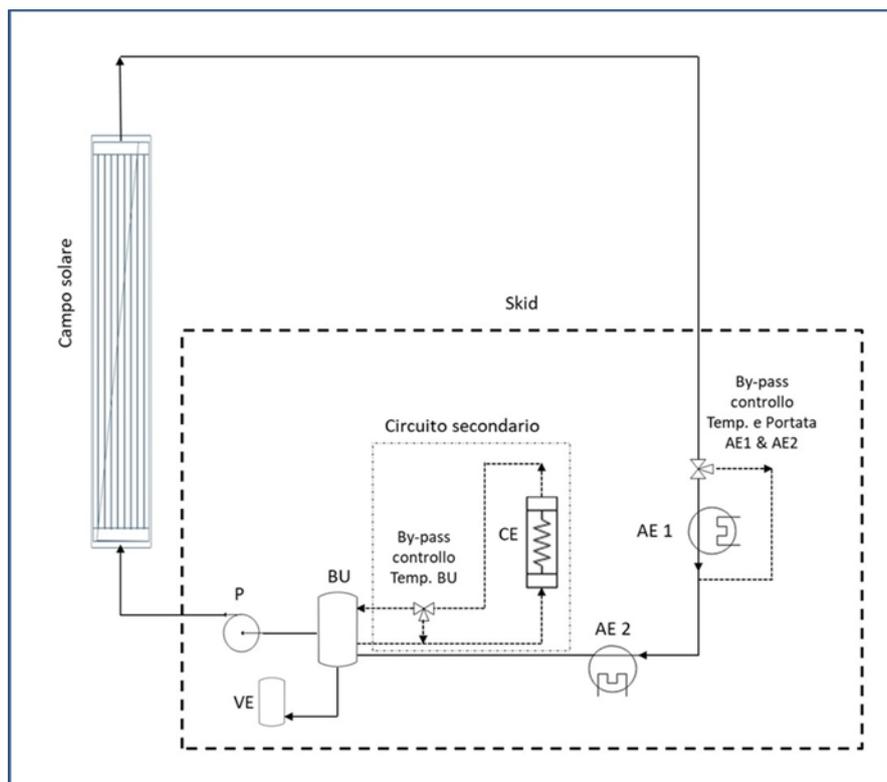


Figura 1. Impianto ENEA-SHIP - schema concettuale

La piattaforma è rappresentativa del funzionamento di sistemi a media temperatura e consente di ottenere la massima flessibilità nella simulazione di casi reali di integrazione tra i sottosistemi di un impianto solare a concentrazione ed i processi industriali (cottura, pastorizzazione e sterilizzazione nel settore agroalimentare e delle bevande; sbiancamento ed essiccazione nel settore tessile; candeggio e preparazione della polpa nella carta; distillazione ed evaporazione in chimica e farmaceutica; trattamento per vernici nel settore automobilistico; fasi specifiche di processi di produzione/trattamento della plastica, pellame, etc.) ma è predisposta per potenziali e futuri interventi di ampliamento. Nell'ambito del presente lavoro viene descritto l'impianto installato (componenti, sottosezioni e circuito completo) con le procedure operative, vengono riportate le fasi di avviamento e di testing, e vengono evidenziati sia i limiti progettuali riscontrati, sia le necessarie future revisioni progettuali.

2 Impianto sperimentale

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 (specchi e strutture di sostegno dei collettori).

La messa in esercizio della piattaforma ha incontrato le tipiche problematiche associate al commissioning dei sistemi sperimentali: a causa di alcune saldature difettose il circuito idraulico è stato completamente svuotato e, solo dopo il rifacimento delle saldature e la loro verifica con il metodo dei liquidi penetranti, è stato nuovamente riempito con olio diatermico (Therminol 66). Anche i supporti del circuito idraulico, che collega l'area skid al campo solare, sono stati oggetto di intervento di ripristino per una migliore compensazione delle dilatazioni termiche. Di seguito si riportano le specifiche e le caratteristiche realizzative dei componenti e delle principali sotto-sezioni dell'impianto.

2.1 Area di installazione

L'impianto ENEA-SHIP è stato realizzato all'interno dell'area dell'impianto sperimentale PCS sito presso il CR ENEA Casaccia ed è un'infrastruttura sperimentale autonoma rispetto all'impianto PCS, pur essendo ad esso connesso in termini di alimentazione elettrica e di sistema di controllo ed acquisizione.

L'impianto in esame è suddiviso in due aree principali:

- area componenti;
- area collettore solare.

I componenti delle due zone sono collegati attraverso il piping, il sistema DCS e le linee elettriche che si diramano dal quadro elettrico. L'area componenti (Figura 2) è posizionata all'interno di un piazzale di cemento armato che si trova ad una quota più bassa di circa 2 m rispetto al livello zero dell'area collettore solare. Nell'area componenti sono stati alloggiati il quadro elettrico, i due aerotermi e lo skid (Figura 3), sul quale sono integrati il riscaldatore elettrico, il vaso di espansione, il buffer e la pompa di circolazione. L'area skid e il quadro elettrico sono provvisti di tettoie per proteggere i componenti dalle intemperie.



Figura 2. Piazzale designato per l'area componenti: a) vista frontale; b) vista di lato.



Figura 3. a) Quadro elettrico; b) Aerotermi e skid.

L'area collettore solare (Figura 4a) è costituita da un piazzale asfaltato con profilo planare intermezzato con alcuni baggioli di cemento armato, adiacente all'impianto PCS. Per il fissaggio al suolo della struttura portante del collettore solare è stato necessario realizzare degli scavi (Figura 4b) per ospitare dei plinti in cemento armato (Figura 5): al di sotto dello strato di asfalto è infatti presente uno strato drenante di lapilli, non adatto alla realizzazione delle fondazioni.



Figura 4. Area del collettore solare: a) prima delle opere di installazione; b) realizzazione degli scavi di fondazione.



Figura 5. a) Particolare di uno scavo; b) Particolare di una fondazione.

2.2 Campo solare

Il campo solare (Figura 6), che ha un design innovativo volto a ridurre il peso delle strutture e la quantità di acciaio utilizzato, è di tipo sperimentale ed è costituito da i) una stringa di collettori solari di tipo Fresnel, di cui si riportano le principali caratteristiche tecniche in Tabella 1, ii) una condotta coibentata per il trasporto del fluido freddo dallo skid all'ingresso del collettore solare e iii) una condotta coibentata dall'uscita del collettore all'ingresso dell'aeroterma AE1. In particolare, il collettore solare è formato da 17 file di specchi primari che captano e concentrano la radiazione solare su un tubo ricevitore posizionato a circa 5 metri dal piano degli specchi primari.

Tabella 1. Principali caratteristiche tecniche del campo solare.

	<i>u.m.</i>	
Tipologia collettore campo solare	-	Lineare Fresnel
Orientamento collettore campo solare	-	E-O
Radiazione solare ANI di picco	W/m ²	863
Radiazione solare ANI minima	W/m ²	300
Numero stringhe del campo solare	unità	1
Lunghezza del collettore	m	38
Larghezza del collettore	m	12
Altezza tubo ricevitore dal piano del terreno	m	6
Altezza del piano degli specchi dal piano del terreno	m	1
Superficie riflettente specchi primari	m ²	332
Numero file specchi primari	unità	17
Efficienza ottica nominale	%	64
Numero tubi ricevitori	unità	9
Tipologia tubo ricevitore	-	ASE HCEMS-11
Fluido termovettore	-	Therminol 66
Temperatura massima circuito campo solare	°C	330
Temperatura uscita campo solare con ANI MAX	°C	320
Portata olio con ANI MAX	kg/s	2.3
Portata olio ANI nulla	kg/s	0.75
Potenza termica con ANI di riferimento	kW _t	159
Potenza termica con ANI di picco	kW _t	178
Potenza termica con ANI minima	kW _t	58.5



Figura 6. Collettore lineare Fresnel installato presso il CR ENEA Casaccia.

Il collettore solare si compone di un telaio portante di tipo reticolare in carpenteria (Figura 7), a cui sono ancorati nella zona inferiore gli specchi primari (Figura 8a) e nella zona superiore il sistema ricevitore costituito da tubi ricevitori e riflettori secondari (Figura 8b). Ciascuna fila di specchi primari ha la possibilità di ruotare per consentire l'inseguimento solare e, con una logica di attuazione indipendente per ogni fila di specchi mediante singoli motoriduttori, è possibile garantire anche una parziale focalizzazione del campo solare, modulando la potenza riflessa e concentrata sul tubo ricevitore. Quest'ultimo è realizzato in acciaio inossidabile austenitico rivestito da un coating spettralmente selettivo in grado di massimare l'assorbimento della radiazione solare (>95%) e di minimizzare l'emissività (<10% a 400 °C). Il riflettore secondario è una lamina di alluminio con una geometria parabolica che ha il compito di captare e reindirizzare sul tubo ricevitore l'aliquota di radiazione non intercettata dal tubo, in modo da massimizzare la captazione del flusso concentrato e migliorare l'efficienza ottica del sistema.

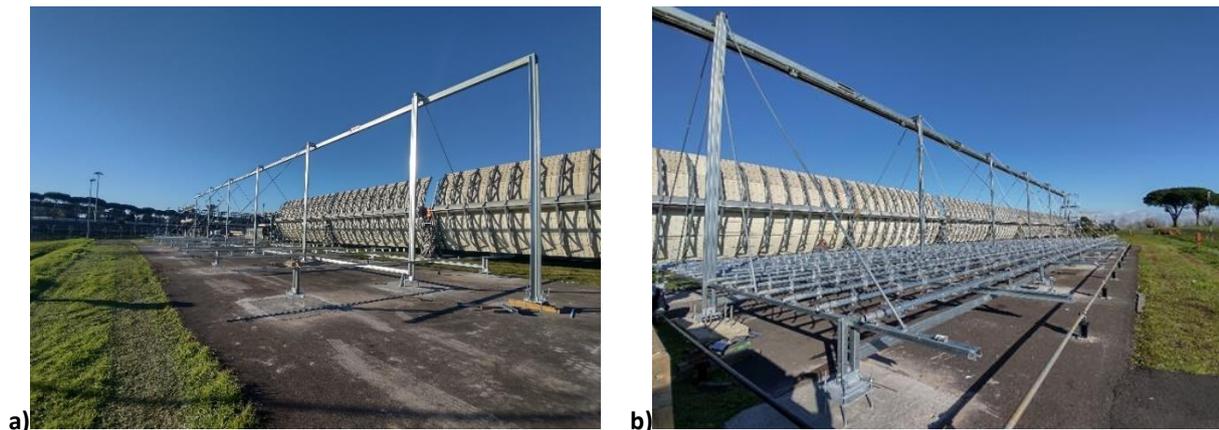


Figura 7. a) Struttura portante del collettore solare; b) struttura di supporto per gli specchi primari.

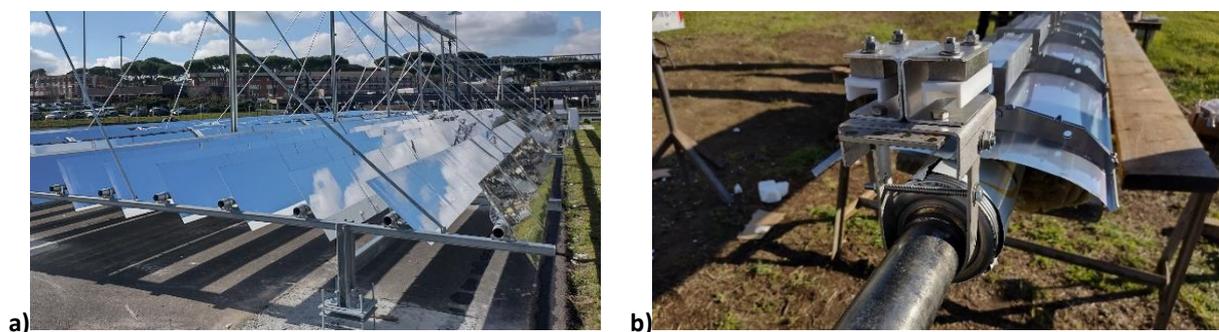


Figura 8. a) Specchi primari installati; b) Sistema ricevitore.

Le principali difficoltà riscontrate nella fase di installazione del campo solare hanno riguardato la realizzazione delle connessioni elettriche e di segnale tra i collettori Fresnel e il sistema di acquisizione e controllo. Inoltre, anche la movimentazione degli specchi è risultata più complessa di quanto inizialmente previsto, a causa della necessità di interfacciare protocolli di segnale diversi (*Modbus* e *Profibus*).

2.3 Riscaldatore elettrico

Il riscaldatore elettrico (Figura 9) è costituito da un corpo principale realizzato con tubi in acciaio al carbonio, all'interno dei quali circola l'olio a diretto contatto con gli elementi riscaldanti delle resistenze elettriche. Gli attacchi prevedono flange in acciaio al carbonio del tipo PN 16. I materiali impiegati per i componenti principali del riscaldatore sono:

- acciaio ASTM A 106 Gr. B e acciaio ASTM A 333 Gr. 6 per i tubi;
- acciaio al carbonio ASTM A 105 per flange e manicotti.
- lana di roccia e lamierino zincato per l'isolamento termico verso l'esterno.

La potenza nominale della caldaia è pari a 100 kW, erogata da 5 resistenze da 20 kW ciascuna, di tipo ON/OFF. Tale potenza è sufficiente sia per riscaldare l'olio durante la fase di avviamento, sia per compensare eventuali dispersioni termiche lungo il circuito. La temperatura e la pressione di progetto sono pari, rispettivamente, a 350 °C e 6 bar; in esercizio la temperatura e la pressione devono essere, rispettivamente, minore o uguale a 320 °C e inferiore a 6 bar. In Tabella 2 si riportano i dati tecnici del riscaldatore elettrico e in Figura 10 si riporta lo schema di impianto.



Figura 9. Riscaldatore elettrico per olio diatermico.

Tabella 2. Dati tecnici del riscaldatore elettrico per olio diatermico.

Grandezza	U.M.	Valore
Potenza elettrica	kW	100
Potenza elettrica	kcal/h	86.000
Pressione di progetto	bar	6
Pressione di utilizzo	bar	< 6
Pressione di prova idraulica	bar	9
Temperatura di progetto	°C	350
Temperatura di esercizio	°C	320
Fluido termovettore	-	Olio diatermico
Capacità totale (corpo + filtro)	l	63
Mandata/Ritorno Olio	-	DN 50 PN 16
Scarico Olio	-	DN 20 PN 16
Attacco collegamento al vaso espansione	-	DN 32 PN 16
Portata Pompa circolazione	m ³ /h	15
Prevalenza Pompa	m	30
Potenza elettrica Motore Pompa	kW	3

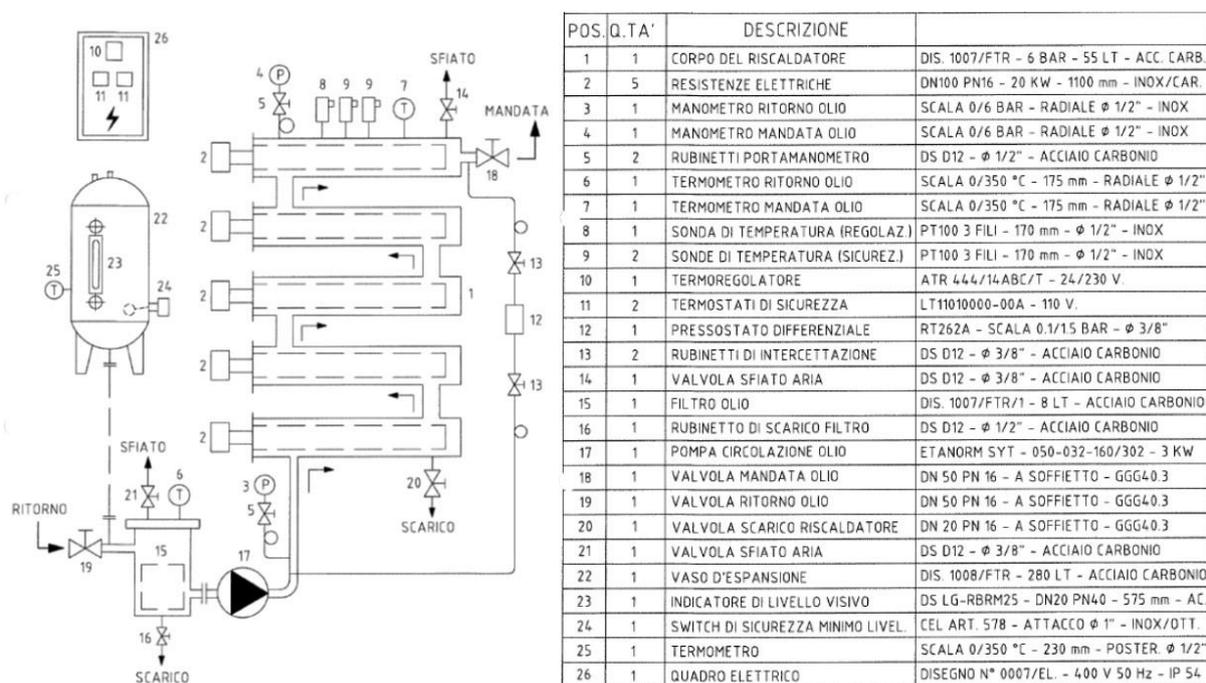


Figura 10. Schema di impianto del riscaldatore elettrico per olio diatermico.

2.4 Aerotermi

Nell'impianto ENEA-SHIP sono stati installati due aerotermi (Figura 11), dimensionati per smaltire una potenza di circa 100 kW termici ciascuno in condizioni nominali. L'Aerotermino 1 (AE1) è uno scambiatore di processo olio-aria, che simula specifiche utenze soprattutto in termini di temperature operative; inoltre la potenza assorbita dall'aerotermino può rappresentare in scala il carico termico dell'utenza in esame; l'Aerotermino 2 (AE2) è uno scambiatore di servizio olio-aria, funzionale al controllo della temperatura dell'olio in ingresso al campo solare.

I due aerotermi sono sostanzialmente costituiti dalle seguenti parti:

- corpo principale composto da tubi alettati;
- telaio;
- connessioni.

I tubi degli scambiatori hanno un diametro esterno di 60.3 mm e uno spessore di 2.0 mm e sono realizzati in acciaio AISI 304/304L. Le alette di scambio in alluminio hanno un'altezza di 27 mm e uno spessore 0.5 mm. Il telaio esterno è realizzato con lamiere in acciaio AISI 304/304L con spessore di 3.0 mm. Le flange di connessione sono DN 50 PN 16 in acciaio AISI 304/304L.

Durante l'esercizio dell'impianto, il fluido termovettore attraversa il campo solare conseguendo un salto termico dipendente dalla DNI, e alimenta termicamente l'utenza (AE1), rilasciando la potenza solare assorbita o una frazione di essa, in funzione delle condizioni operative dell'utenza da simulare. La potenza rilasciata dall'AE1 viene modulata attraverso il controllo della portata della linea di by-pass, disposta in parallelo all'AE1, la portata di aria del ventilatore, le temperature di ingresso e di uscita dell'olio diatermico. Come precedentemente menzionato, se necessario, la temperatura del fluido termovettore viene riportata al valore di temperatura smaltendo la potenza in eccesso nell'AE2.

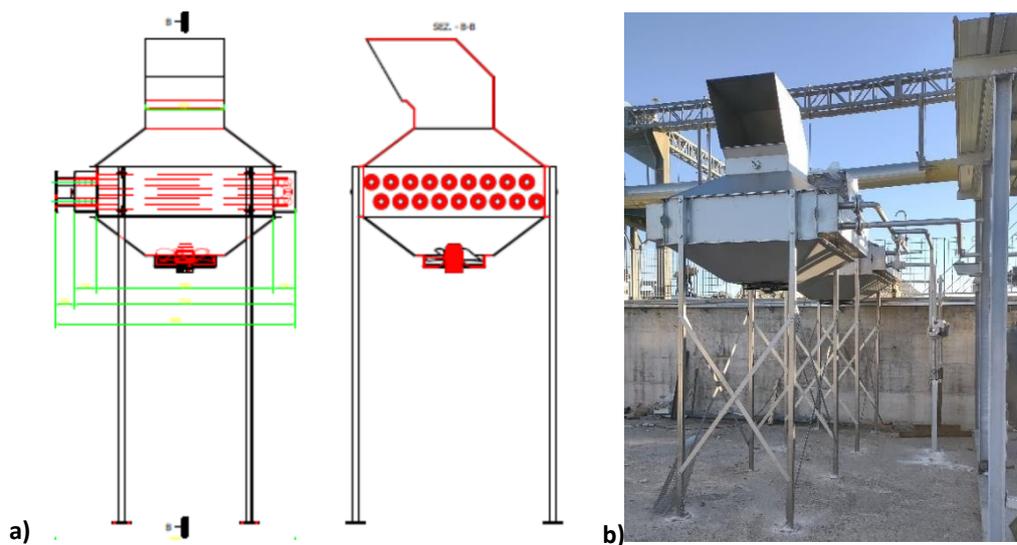


Figura 11. a) Disegno costruttivo e b) immagine degli aerotermi.

2.5 Sistema di acquisizione dati

Il controllo e l'acquisizione dei dati del circuito sperimentale ENEA-SHIP è gestito dalla sala controllo del pre-esistente impianto PCS (Prova Collettori Solari). In particolare, il sistema di Supervisione, Controllo e Acquisizione dati sperimentali è organizzato in modo da garantire una separazione fra le funzioni di supervisione e controllo dell'impianto (DCS) e le funzioni di acquisizione, registrazione ed elaborazione delle grandezze di interesse sperimentali (DAS).

Il Sistema DAS ha accesso a gran parte delle grandezze misurate ai fini della Supervisione e Controllo del DCS attraverso il sistema OPC (Open Protocol Collect); tali segnali, opportunamente selezionati, sono acquisiti in maniera separata per evitare interferenze con la gestione di impianto.

Lo schema concettuale dell'architettura del sistema DCS è riportato in Figura 12, dove viene evidenziata la connessione tra la piattaforma sperimentale PCS (comprensiva degli impianti ORC-PLUS e RESLAG) e la nuova unità di controllo dell'impianto ENEA-SHIP (in rosso).

Questa configurazione di sistema, con l'aggiunta di un nuovo quadro DCS Remoto per la parte dedicata all'impianto ENEA-SHIP, consente di utilizzare la strumentazione (Hardware e Software) già in uso presso l'impianto PCS. L'aggiunta di un nuovo quadro DCS dedicato consente inoltre la gestione simultanea dei diversi impianti afferenti alla medesima sala controllo anche ad opera di un solo addetto. I segnali acquisiti attraverso l'OPC vengono registrati e archiviati in un PC dedicato al processamento e all'analisi dei dati.

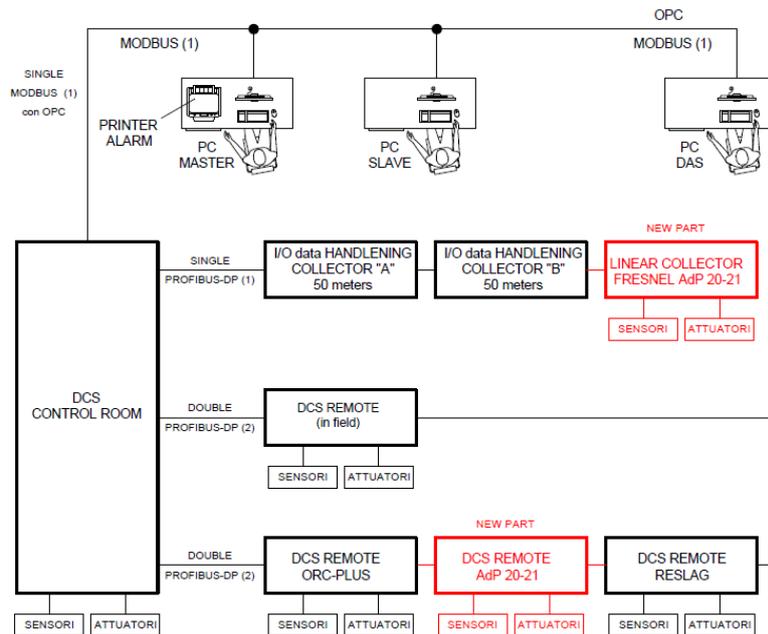


Figura 12. Schema generale dell'architettura del sistema DCS per la piattaforma sperimentale ENEA-SHIP/PCS.

2.5.1 Sistema DCS

Di seguito vengono elencati i principali elementi hardware del sistema DCS:

- Rete di comunicazione esterna: rete Ethernet con cui l'ENEA Casaccia si interfaccia con il mondo esterno.
- Rete di comunicazione locale MODBUS: rete Ethernet locale che permette il collegamento fra le postazioni degli Operatori per la Supervisione e Controllo di impianto, l'unità centrale (CPU del DCS), e alcuni armadi in campo. A questa rete è anche collegato il PC per il post-processing dei dati sperimentali acquisiti e archiviati via OPC. Il collegamento con MODBUS è ridondato al 100%.
- Bus di campo, PROFIBUS-DP: a causa del numero di I/O presenti sul campo e l'estensione dell'impianto, per ridurre il numero dei cablaggi solitamente si utilizza un bus di campo con protocollo non proprietario, per il collegamento ad altri armadi di I/O remoti. Il collegamento con PROFIBUS-DP è ridondato al 100%.
- Unità Centrale: adibita all'elaborazione dei dati in ingresso e all'attuazione del processo, secondo le logiche di controllo implementate nel programma installato, e comunica in maniera diretta con le schede I/O di tutto l'impianto disposte nei vari armadi.
- Interfaccia con il sistema di movimentazione collettori: il controllore locale della movimentazione dei collettori Fresnel comunica con il DCS tramite bus standard PROFIBUS-DP. Tramite l'interfaccia, il DCS può inviare comandi per definire lo stato del collettore (stand-by, operativo, emergenza, messa fuori fuoco, sincronizzazione con il clock centrale) e ricevere informazioni sullo stato del collettore, sulla posizione attuale (misurata tramite encoder digitale), e su misure da eventuali sensori locali.
- Clock di sistema: la precisione del clock deve consentire un errore massimo di +/- 1 secondo rispetto all'ora ufficiale locale, con aggiornamento automatico, e fa sempre riferimento all'ora Solare.
- Quadro DCS: armadio in campo per l'I/O dei segnali da acquisire.

2.5.3 Misure di temperatura

Le misure di temperatura, su tubazione o su buffer, sono state effettuate tramite un pozzetto termometrico, chiuso nella parte a contatto con il processo (filettatura femmina da 1/8 GAS-F). Il pozzetto è stato saldato alla tubazione con un inserimento pari alla metà del diametro della tubazione mentre è stato saldato al buffer con un inserimento di 300 mm. La parte esterna, sia per la tubazione che per il buffer, è di 50 mm. Al pozzetto è stato avvitato un tubo inox filettato 1/4 GAS M-M di lunghezza tale da uscire dalla coibentazione (Figura 14).

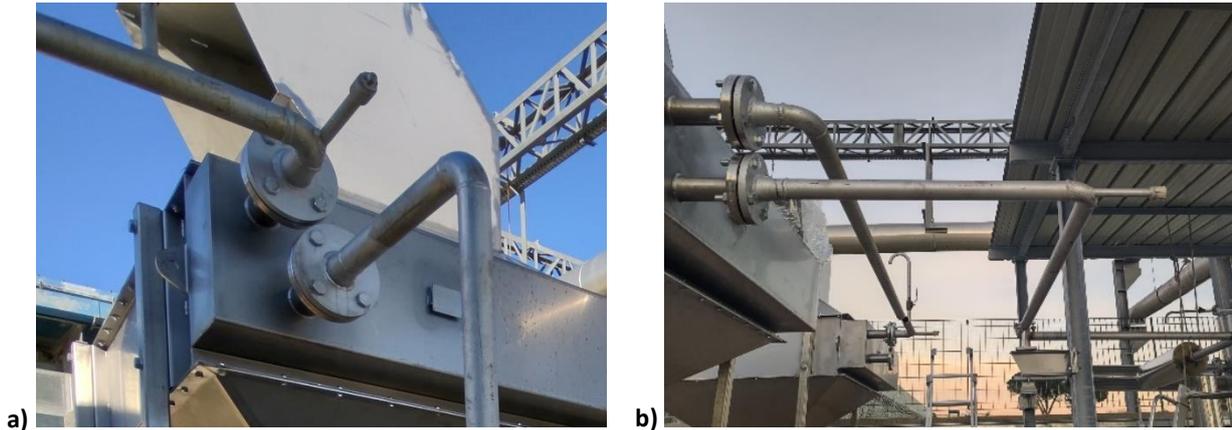


Figura 14. Pozzetti termometrici per le misure di temperatura del fluido termovettore a) in uscita dall'Aerotermino 1 e b) in uscita dall'Aerotermino 2.

Al tubo è stato avvitato un ulteriore raccordo che permette il passaggio della termocoppia e che ha da una parte 1/4 GAS F e dall'altra un sistema con ogiva per bloccare la termocoppia nella posizione desiderata (Figura 15). La termocoppia tocca il fondo del pozzetto, mentre il suo stelo è fissato tramite l'ogiva del raccordo, in modo da evitare l'allentamento della termocoppia stessa. Questo sistema viene utilizzato per facilitare la verifica o la sostituzione della termocoppia senza smontare la coibentazione.



Figura 15. Punto di misura della temperatura del fluido termovettore in ingresso alla valvola a 3 vie RV.1C.01, prima di entrare negli aerotermini: a) pozzetto termometrico; b) termocoppia installata.

In particolare, sull'impianto sono acquisite:

- temperatura (TE.1C.01) dell'olio sulla mandata della pompa principale MPC.1C.01;
- temperatura (TE.1C.03) dell'olio in ingresso al campo solare CSF.1C.01;

- temperatura (TE.1C.04) dell'olio in uscita dal campo solare CSF.1C.01;
- temperatura (TE.1C.05) dell'olio in ingresso agli aerotermi, prima della valvola a tre vie RV.1C.01;
- temperatura (TE.1C.06) dell'olio in uscita dall'aerotermo AE.1C.01;
- temperatura (TE.1C.07) dell'olio in uscita dall'aerotermo AE.1C.02;
- temperatura (TE.1C.08) dell'olio sul buffer BUF.1C.01 in prossimità del punto di aspirazione della pompa MPC.1C.01;
- temperatura (TE.1C.09) in uscita dal riscaldatore elettrico;
- temperatura (TE.1C.011) dell'aria in uscita dall'aerotermo AE.1C.01.

2.5.4 Misure di pressione

Le misure di pressione sono effettuate mediante un tubo appena passante da 1/2 GAS saldato sul corpo della tubazione/buffer. La lunghezza del tubo è superiore allo spessore della coibentazione, e la parte esterna è saldata ad un Coil di raffreddamento, mentre l'altro lato viene filettato 1/2 GAS-M. Al Coil lato filettatura viene avvitato un rubinetto, di radice, 1/2 GAS F-F. Alla filettatura rimasta del rubinetto viene avvitato il trasmettitore di pressione. Tali misure possono essere di acquisizione, regolazione e di sicurezza, secondo quanto previsto nel progetto.

In particolare, sull'impianto sono acquisite le seguenti grandezze:

- pressione (PI.1C.010) in aspirazione sulla pompa principale MPC.1C.01;
- pressione (PI.1C.001) in mandata sulla pompa principale MPC.1C.01;
- pressione (PI.1C.009) dell'azoto nel vaso di espansione EX.1C.01.

2.5.5 Misure di portata

Nell'impianto ENEA-SHIP vengono effettuate due misure riferite al circuito olio effettuate tramite un misuratore in linea tra flange del tipo VORTEX e una misura riferita alla portata aria in uscita dal primo aerotermo tramite un misuratore ad inserzione. In particolare, sull'impianto sono acquisite:

- portata (FIC.1C.001) di olio in mandata sulla pompa principale MPC.1C.01;
- portata (FIC.1C.003) di olio in uscita dall'aerotermo AE.1C.01;
- portata (FIC.1C.002) di aria elaborata dal ventilatore sull'aerotermo AE.1C.01.

2.5.6 Indicatori locali

Nel circuito sono presenti tre diversi tipi di indicatori locali, la cui posizione è compatibile con una visione altezza uomo:

- Indicatori di temperatura;
- Indicatori di pressione;
- Indicatori di livello.

2.5.7 Sicurezze

Il circuito presenta due tipi di sicurezze, atte ad effettuare azioni dirette di intervento secondo quanto stabilito nel progetto finale:

- Termostati: intervengono in caso di temperatura fuori limite prestabilito;
- Pressostati: intervengono in caso di pressione fuori limite prestabilito.

3 Procedure

Le diverse procedure riportate di seguito e le prove sperimentali sull'impianto ENEA-SHIP vengono eseguite operando principalmente sulla schermata della consolle del DCS (Figura 16) e sul pannello locale del riscaldatore elettrico (Figura 17).

Dalla consolle del DCS è possibile impartire i seguenti comandi:

- Accensione/Spegnimento del quadro del riscaldatore elettrico CE.1C.01;
- Accensione/Spegnimento delle cinque resistenze del riscaldatore elettrico;
- Apertura/Chiusura delle valvole del circuito azoto sul vaso di espansione, EV.1C.01 e EV.1C.02;
- Gestione della valvola a tre vie RV.1C.02 per la regolazione del flusso di olio tra il riscaldatore elettrico CE.1C.01 e il buffer BUF.1C.01;
- Accensione/Spegnimento del motore della pompa principale di circolazione MPC.1C.01;
- Regolazione dell'inverter Inv.MPC.1C.01 sulla pompa principale di circolazione MPC.1C.01;
- Selezione della modalità operativa (in automatico) del collettore solare CSF.1C.01 in tre diverse configurazioni:
 - Stand by: il movimento degli specchi primari viene bloccato ad una posizione specifica (superficie specchiante rivolta verso Nord).
 - Inseguimento in fuoco: gli specchi primari sono movimentati in maniera indipendente gli uni dagli altri, seguendo il moto apparente del sole e riflettendo la radiazione solare sul tubo ricevitore.
 - Inseguimento fuori fuoco: gli specchi primari sono posizionati in modo tale che la radiazione solare riflessa non intercetti i tubi ricevitori, allo scopo di ridurre la temperatura del fluido che circola all'interno del collettore solare.
- Accensione/Spegnimento del motore MAE.1C.01 del ventilatore sull'aerotermo AE.1C.01;
- Regolazione dell'inverter Inv.MAE.1C.01 del ventilatore MAE.1C.01;
- Gestione della valvola a tre vie RV.1C.01 per la regolazione del flusso di olio tra l'aerotermo AE.1C.01 e l'aerotermo AE.1C.02;
- Accensione/Spegnimento del motore MAE.1C.02 del ventilatore sull'aerotermo AE.1C.02;
- Regolazione dell'inverter Inv.MAE.1C.02 ventilatore MAE.1C.02;
- Apertura/Chiusura delle serrande SE.1C.03 sull'aerotermo AE.1C.02.

Dal pannello locale del riscaldatore elettrico è possibile eseguire:

- Abilitazione del funzionamento del riscaldatore in LOCALE o da REMOTO;
- Avvio/Arresto della pompa di circolazione MPC.1C.02 del riscaldatore elettrico CE.1C.01;
- Regolazione della temperatura di riferimento TE.1C.009;
- Regolazione degli intervalli di temperatura per l'Accensione/Spegnimento delle resistenze;
- Abilitazione del funzionamento delle cinque resistenze.

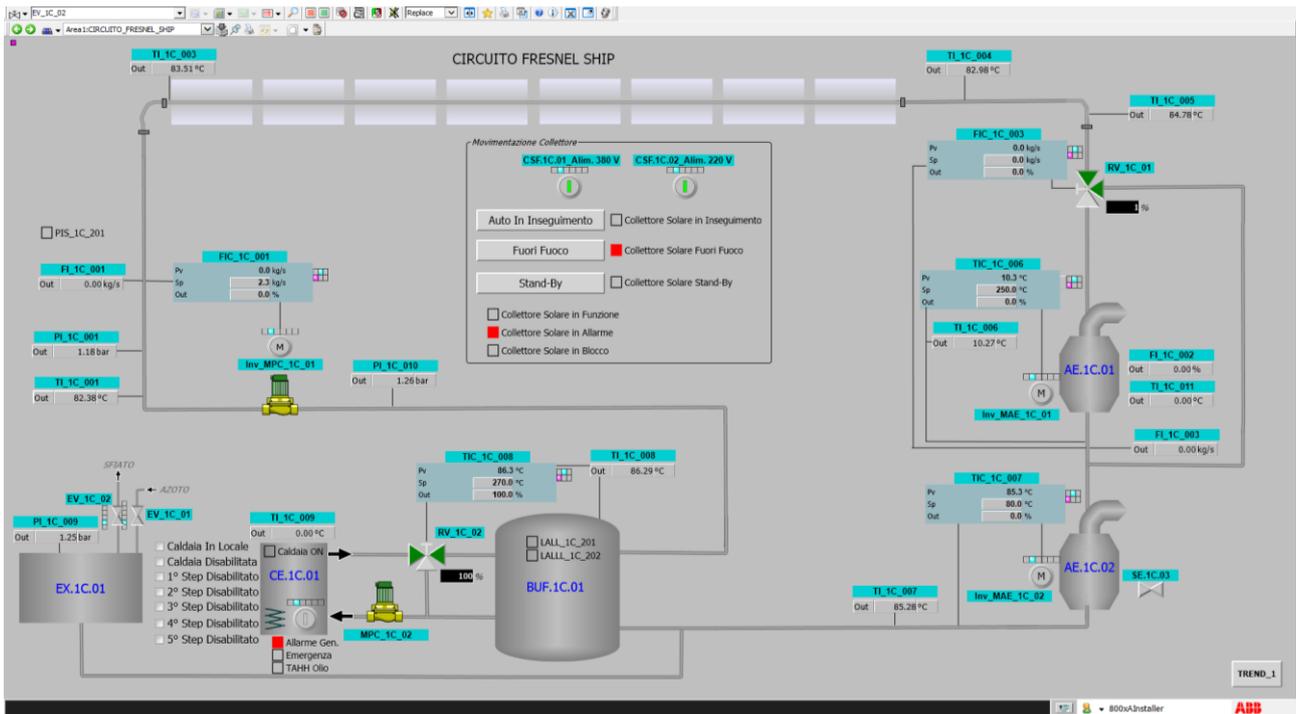


Figura 16. Schermata della consolle del DCS.



Figura 17. Pannello di comando locale del riscaldatore elettrico.

Tra le diverse procedure, occorre prestare particolare attenzione alla fase di riempimento dell'impianto che viene eseguita in modo da eliminare completamente l'aria contenuta nel circuito. In tale fase operativa viene utilizzata una pompa ausiliaria di riempimento collegata ai punti più bassi del circuito, in modo da facilitare l'espulsione dell'aria dal loop idraulico. A questo scopo sono stati individuati quattro punti di riempimento (Figura 18): rubinetto in aspirazione pompa principale di circolazione MPC.1C.01, valvola di

scarico del riscaldatore elettrico CE.1C.01, rubinetto su tubazione in ingresso aerotermi AE.1C.01 e AE.1C.02, e rubinetto sotto il vaso di espansione EX.1C.01.

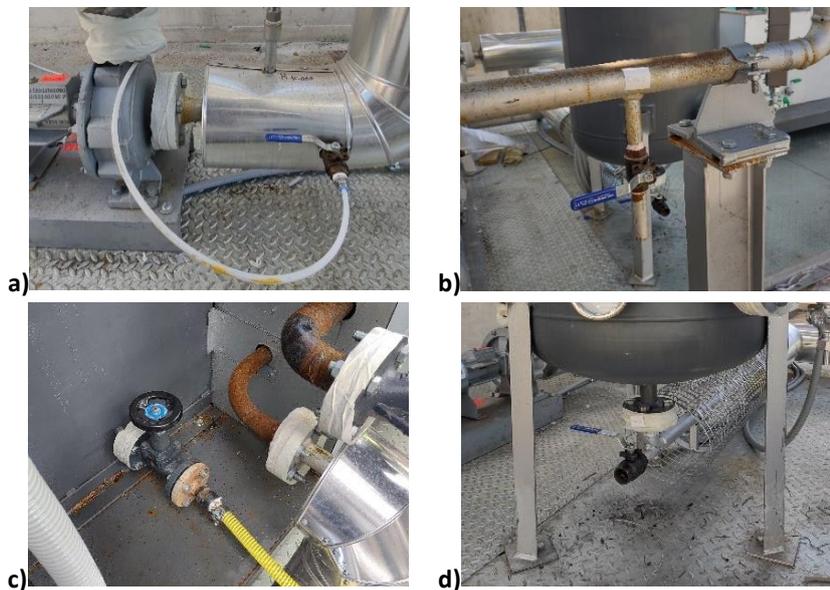


Figura 18. Punti di immissione dell'olio nel circuito dell'impianto ENEA-SHIP: a) rubinetto su aspirazione pompa di circolazione; b) rubinetto su tubazione in ingresso aerotermi; c) valvola di scarico del riscaldatore elettrico; d) rubinetto sotto il vaso di espansione.

3.1 Procedura di caricamento olio

Di seguito vengono riportate le azioni previste per il caricamento dell'olio sull'impianto ENEA-SHIP.

- Verifica dell'assenza di acqua dal circuito (altrimenti è necessario asciugare le tubazioni con aria calda).
- Verifica della chiusura della valvola di scarico del riscaldatore CE.1C.01.
- Verifica della chiusura del rubinetto di scarico del filtro e del rubinetto di scarico dell'indicatore di livello sul vaso d'espansione EX.1C.01.
- Sul riscaldatore, verifica dell'apertura delle valvole di mandata e di ritorno dell'olio verso il buffer BUF.1C.01, dei rubinetti porta-manometro, del rubinetto di sfiato sul filtro e sul riscaldatore e dei rubinetti di intercettazione del pressostato differenziale.
- Sul vaso di espansione, verifica dell'apertura delle valvole di intercettazione sull'indicatore di livello e della valvola EV.1C.02 di sfiato dell'azoto.
- Sul vaso di espansione, verifica della chiusura della valvola EV.1C.01 di caricamento dell'azoto.
- Verifica della completa apertura della valvola di intercettazione sulla condotta mandata pompa.
- Verifica dell'apertura intermedia della valvola a tre vie RV.1C.01 di by-pass sugli aerotermi e della valvola a tre vie RV.1C.02 installata tra riscaldatore elettrico e buffer (apertura al 50% di entrambe le uscite A e B).
- Verifica della completa apertura di: rubinetto di sfiato del buffer BUF.1C.01, rubinetto di sfiato sulla condotta tra i due aerotermi AE.1C.01 e AE.1C.02, rubinetto di sfiato tra l'aerotermo AE.1C.02 e il buffer BUF.1C.01, e rubinetto di sfiato in uscita dal collettore solare CSF.1C.01.

- Riempimento dell'impianto con la pompa ausiliaria collegata ai quattro punti suindicati: rubinetto in aspirazione pompa di ricircolo, valvola di scarico del riscaldatore elettrico, rubinetto su tubazione in ingresso aerotermi e rubinetto sotto il vaso di espansione.
- Durante il riempimento, chiusura dei rubinetti delle valvole di sfiato da cui gradualmente inizia a fuoriuscire olio privo di bolle d'aria.¹
- Durante il progressivo riempimento, chiusura del rubinetto della valvola EV.1C.02 di sfiato dell'azoto sul vaso di espansione EX.1C.01 in corrispondenza della prima fuoriuscita di olio privo di bolle d'aria. Successivamente, apertura della valvola di caricamento dell'azoto sul vaso di espansione fino all'applicazione di una pressione sufficiente a riportare il livello dell'olio ad un quarto del volume del vaso di espansione.
- Successivamente, chiusura graduale dei restanti rubinetti sulle valvole di sfiato².

3.2 Procedura di primo avviamento a freddo (con olio ad almeno 20 °C)

Il primo avviamento dell'impianto ENEA-SHIP è stato eseguito a freddo per le prime due ore. Le fasi operative sono di seguito elencate:

- Accensione del quadro elettrico di comando del riscaldatore elettrico CE.1C.01.
- Spegnimento dei tasti RIARMO sul quadro che risultano accesi per eliminare gli eventuali allarmi attivi.
- Avviamento della pompa di circolazione MPC.1C.02 del riscaldatore con il comando MARCIA LOCALE POMPA OLIO sul quadro elettrico.
- Avviamento della pompa di circolazione MPC.1C.01 del campo solare da consolle del DCS.
- Apertura intermittente di tutti i rubinetti di sfiato (tranne quella di scaricamento azoto), e loro chiusura in corrispondenza dell'uscita di olio diatermico, per eliminare l'aria residua.
- Spegnimento delle pompe a seguito della completa espulsione dell'aria.
- Controllo dei filtri in aspirazione delle due pompe e, se necessario, loro pulizia.
- Verifica della tenuta delle varie connessioni, e serraggio dei bulloni in caso di eventuali perdite.
- Ripristino del livello dell'olio nel vaso di espansione fino alla stabilizzazione della circolazione dell'olio nell'impianto.

3.3 Procedura di primo avviamento a caldo

La procedura di primo avviamento a caldo viene eseguita a seguito di periodi di fermo macchina o a valle dello svuotamento dell'impianto per operazioni di manutenzione dei componenti e pulizia delle linee idrauliche. Tale procedura si compone delle seguenti fasi:

- Impostazione della valvola a tre vie RV.1C.02 (tra il riscaldatore elettrico CE.1C.01 e il buffer BUF.1C.01) su OUT pari a 0% (by-pass aperto verso il buffer).
- Spegnimento dell'Inverter Inv.MAE.1C.01 dell'aerotermeo AE.1C.01.
- Spegnimento dell'Inverter Inv.MAE.1C.02 dell'aerotermeo AE.1C.02.
- Chiusura della serranda SE.1C.03 dell'aerotermeo AE.1C.02.
- Impostazione delle elettrovalvole EV.1C.01 e EV.1C.02 del vaso di espansione in modalità automatica (dopo la fase di spegnimento sono in modalità manuale e in stato CHIUSO).
- Accensione del quadro del riscaldatore elettrico CE.1C.01 da consolle DCS.

¹ I primi rubinetti interessati alla chiusura sono quelli del riscaldatore elettrico posizionati sul filtro olio e sul corpo del riscaldatore

² L'ultimo rubinetto interessato alla chiusura è quello in uscita dal campo solare CSF.1C.01.

- Azionamento di tutti i tasti RIARMO sul quadro del riscaldatore elettrico CE.1C.01 che risultano accesi per eliminare gli eventuali allarmi attivi.
- Impostazione della temperatura TE.1C.009 di regolazione del riscaldatore elettrico a 80 °C.
- Avviamento della pompa di circolazione MPC.1C.02 del riscaldatore elettrico (tasto MARCIA LOCALE POMPA OLIO sul quadro elettrico).
- Accensione di una sola resistenza elettrica tramite i selettori presenti sul quadro elettrico di comando del riscaldatore elettrico (selettore RESISTENZA su 1). Il riscaldamento deve avvenire molto lentamente (circa 30°C all'ora) fino a raggiungere gli 80 °C (tempo necessario: circa 2,5 ore).
- Verifica del corretto comportamento della caldaia ed espulsione dell'aria dagli appositi rubinetti sul riscaldatore elettrico e sul buffer.
- In corrispondenza di una temperatura di 80 °C, da consolle DCS impostazione della valvola a tre vie RV.1C.01 (tra i due aerotermi) su OUT pari a 100% (by-pass chiuso).
- Impostazione (in manuale) della portata dell'olio in mandata pompa FIC.1C.001 su OUT pari a 0%.
- Accensione della pompa di circolazione MPC.1C.01 del campo solare da consolle DCS e impostazione (in manuale) della portata in mandata pompa FIC.1C.001 su OUT pari a 30%.
- Impostazione della valvola a tre vie RV.1C.01 su OUT pari a 30%.
- Esecuzione degli spurghi d'aria da tutti i rubinetti presenti sull'impianto.
- Raggiunta la temperatura di 80 °C su tutto l'impianto, lento riscaldamento (circa 15 °C all'ora) dell'olio fino a 120 °C (tempo necessario circa 3 ore).
- Mantenimento della temperatura di 120 °C per favorire l'evaporazione dell'acqua presente nell'impianto.
- Intensificazione degli sfiati di aria e vapore da tutti i rubinetti dell'impianto.
- Da consolle DCS impostazione (in manuale) della portata FIC.1C.001 della pompa principale con Out pari a 60%.
- Riscaldamento graduale dell'impianto, fino al raggiungimento della temperatura di esercizio (290 °C), azionando tutte le resistenze elettriche tramite i selettori RESISTENZA 0-1 presenti sul quadro elettrico di comando.
- Controllo della tenuta delle giunzioni e verifica del comportamento di tutti gli accessori. In assenza di problemi, l'impianto può considerarsi pronto per l'utilizzo.
- In corrispondenza del funzionamento a regime dell'impianto, chiusura dei rubinetti di sfiato con un tappo.

3.4 Procedura di normale avviamento

La procedura di normale avviamento dell'impianto ENEA-SHIP durante la campagna sperimentale si compone delle seguenti fasi:

- Impostazione, dalla consolle DCS, della valvola a tre vie RV.1C.02 (tra il riscaldatore elettrico CE.1C.01 e il buffer BUF.1C.01) su OUT pari a 0% (by-pass aperto verso il buffer).
- Impostazione, dalla consolle DCS, della valvola a tre vie RV.1C.01 su OUT pari a 100% (by-pass chiuso).
- Spegnimento dell'Inverter Inv.MAE.1C.01 dell'aerotermeo AE.1C.01.
- Spegnimento dell'Inverter Inv.MAE.1C.02 dell'aerotermeo AE.1C.02.
- Chiusura della serranda SE.1C.03 dell'aerotermeo AE.1C.02.
- Impostazione delle elettrovalvole EV.1C.01 e EV.1C.02 del vaso di espansione in modalità automatica (dopo la fase di spegnimento si trovano in modalità manuale e in stato CHIUSO).
- Accensione del quadro del riscaldatore elettrico CE.1C.01 da consolle DCS.
- Azionamento dei comandi RIARMO sul quadro del riscaldatore elettrico CE.1C.01 (che risultano accesi) per eliminare gli eventuali allarmi attivi.
- Verifica/Impostazione della temperatura di regolazione del riscaldatore elettrico (considerando un ΔT di 10 °C rispetto alla temperatura di prova TE.1C.005 dell'aerotermeo AE.1C.01);

- Avviamento della pompa di circolazione MPC.1C.02 del riscaldatore attraverso il comando MARCIA LOCALE POMPA OLIO sul quadro elettrico.
- Accensione delle resistenze elettriche tramite i selettori presenti sul quadro elettrico di comando del riscaldatore elettrico, muovendo i selettori RESISTENZA su 1;
- Impostazione (in manuale) della portata in mandata pompa FIC.1C.001 su OUT pari a 0%.
- Accensione della pompa di circolazione MPC.1C.01 del campo solare da console DCS.
- Impostazione (in manuale) della portata in mandata pompa FIC.1C.001 ai fini del controllo della temperatura TE.1C.008 misurata sul buffer BUF.1C.01:
 - Out FIC.1C.001 = 30% per TE.1C.008 fino a 60 °C;
 - Out FIC.1C.001 = 60% per TE.1C.008 fino a 120 °C;
 - Out FIC.1C.001 = 80% per TE.1C.008 fino a 200 °C;
 - Out FIC.1C.001 = 100% per TE.1C.008 superiore a 200 °C;
- All'avviamento della pompa principale MPC.1C.01, impostazione della valvola a tre vie RV.1C.01 con OUT pari a 30% fino al raggiungimento di una temperatura pari a 240°C della TE.1C.005 in ingresso all'aeroterma AE.1C.01. Successivamente regolazione della portata come da condizioni di prova.
- Modulazione della temperatura di regolazione del riscaldatore elettrico fino al raggiungimento delle condizioni di prova, eventualmente agendo sulla temperatura di regolazione del riscaldatore elettrico.
- Impostazione del campo solare CSF.1C.01 nella modalità desiderata.

3.5 Procedura di fermata e spegnimento

La fermata dell'impianto richiede circa 20-30 minuti e richiede l'esecuzione delle fasi di seguito riportate. Se comunque si rileva un aumento della temperatura dell'olio anche ad impianto fermo, è opportuno accendere nuovamente le pompe di circolazione olio per alcuni minuti in modo da smaltire eventuale calore accumulatosi.

- Defocalizzazione dei collettori solari (campo solare in Fuori Fuoco).
- Spegnimento delle resistenze elettriche tramite i selettori presenti sul quadro elettrico di comando del riscaldatore elettrico, impostando i selettori RESISTENZA su 0;
- Avviamento (in manuale) dell'aeroterma AE.1C.01 con la massima portata di aria impostando l'OUT di TIC.1C.006 al 100%.
- Apertura della serranda SE.1C.03 dell'aeroterma AE.1C.02.
- Avviamento (in manuale) dell'aeroterma AE.1C.02 con la massima portata di aria impostando l'OUT di TIC.1C.007 al 100%.
- In corrispondenza di temperature inferiori a 150 °C, graduale riduzione della portata della pompa di circolazione MPC.1C.01 e, infine, spegnimento della pompa.
- Spegnimento dell'aeroterma AE.1C.01.
- Spegnimento dell'aeroterma AE.1C.02.
- Chiusura della serranda SE.1C.03 dell'aeroterma AE.1C.02.
- Chiusura in manuale delle elettrovalvole EV.1C.01 e EV.1C.02 del vaso di espansione.
- Chiusura in manuale della valvola dell'azoto.
- Arresto della pompa di circolazione del riscaldatore attraverso l'azionamento del tasto ARRESTO POMPA OLIO sul quadro elettrico.
- Spegnimento del quadro del riscaldatore elettrico CE.1C.01 da console DCS.

3.6 Procedura di svuotamento

La procedura di svuotamento dell'impianto richiede il convogliamento dell'olio freddo in una vasca di stoccaggio o in fusti, con l'apertura dei rubinetti utilizzati nella fase di caricamento (rubinetto in aspirazione

pompa di circolazione, valvola di scarico del riscaldatore elettrico, rubinetto su tubazione in ingresso aerotermi, rubinetto sotto il vaso di espansione) e la valvola di scarico e del filtro degasatore sul riscaldatore elettrico.

Nella fase finale, per rompere il vuoto, può essere necessario aprire le valvole di sfiato aria.

4 Modello previsionale del campo solare

Nel presente paragrafo si presenta il modello termico appositamente sviluppato per l'analisi del comportamento del campo solare dell'impianto ENEA-SHIP, composto da una stringa di collettori lineari Fresnel le cui caratteristiche geometriche sono riportate in Tabella 1 (paragrafo 2.2). Per valutare la potenza che può essere effettivamente raccolta e trasferita al fluido è necessario tener conto del rendimento del collettore sia dal punto di vista ottico che termico. In Figura 19 è mostrato uno schema semplificato dei flussi energetici caratteristici per un collettore Fresnel.

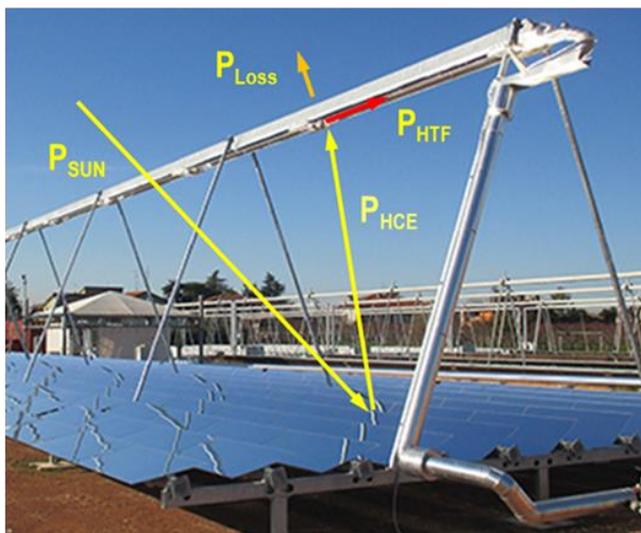


Figura 19. Schema semplificato dei flussi di energia nel collettore.

Nel caso dei collettori lineari, ai fini della valutazione della radiazione effettivamente incidente sulla superficie degli specchi, occorre conoscere la posizione del sole, sia trasversalmente che longitudinalmente rispetto all'asse dei collettori (Figura 20). Dal punto di vista modellistico, per i collettori lineari, tipicamente si definisce un fattore modificatore dell'angolo di incidenza (IAM), dato dal prodotto dei termini trasversale e longitudinale.

In generale, per un sistema a concentrazione, si definisce angolo di incidenza trasversale l'angolo formato dalla proiezione del sole nel piano trasversale al tubo ricevitore e l'asse verticale del concentratore. Oltre alla variazione dell'angolo di incidenza sugli specchi, occorre tener conto di una variazione di area di apertura intercettata dalla radiazione solare diretta, ed effetti di ombreggiamento tra specchi adiacenti e del ricevitore sull'ottica primaria; tutti questi fattori concorrono alla riduzione della radiazione che effettivamente incide sul collettore e vengono tenuti in conto con lo IAM trasversale (IAM_t).

In questo lavoro viene utilizzato un termine longitudinale (IAM_l), dipendente dall'angolo di incidenza, ovvero l'angolo formato dalla direzione del Sole e dalla sua proiezione nel piano trasversale al tubo ricevitore. Questa non è però l'unica definizione utilizzata: un'alternativa frequente (IAM_l) dipende invece dall'angolo di incidenza longitudinale, definito come l'angolo tra la proiezione del sole nel piano longitudinale (cioè il piano verticale contenente il ricevitore) e la direzione verticale. Si tratta di due fattorizzazioni diverse ma equivalenti nella pratica, con buona approssimazione. Gli angoli citati sono rappresentati schematicamente in Figura 20.

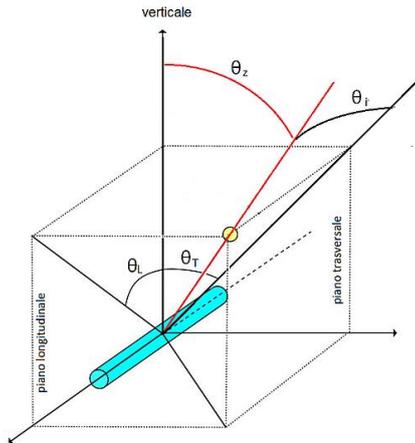


Figura 20. Definizione degli angoli di incidenza per un collettore Fresnel.

$$\theta_l = \arctan (\cos (\gamma - \gamma_c) \cdot \tan (\theta_z))$$

$$\theta_t = \arctan (\sin (\gamma - \gamma_c) \cdot \tan (\theta_z))$$

$$\theta_i = \arcsin (\cos (\gamma - \gamma_c) \cdot \sin (\theta_z))$$

θ_l : angolo di incidenza longitudinale;
 θ_t : angolo di incidenza trasversale;
 θ_i : angolo d'incidenza;
 θ_z : angolo zenitale;
 γ : angolo di azimuth del sole;
 γ_c : angolo di inclinazione dei collettori solari.

La radiazione normale alla superficie del collettore, *ANI* (Aperture Normal Irradiance), è calcolata attraverso la seguente relazione:

$$ANI = DNI \cdot IAM(\gamma, \theta_z) = DNI \cdot IAM_l(\theta_l) \cdot IAM_t(\theta_t) \quad (1)$$

L'angolo d'incidenza e l'angolo di incidenza trasversale dipendono dalle caratteristiche del concentratore.

Determinato il valore dell'*ANI* e conoscendo l'area del collettore solare A_{coll} , è possibile valutare la potenza termica solare raccolta P_{SUN} attraverso la seguente relazione:

$$P_{SUN} = ANI \cdot A_{coll} \quad (2)$$

La potenza termica che può essere concentrata sul tubo ricevitore, *HCE* (Heat Collecting Element), P_{HCE} , dipende dall'efficienza ottica nominale del collettore (η_{opt}), come evidenziato nella seguente relazione:

$$P_{HCE} = P_{SUN} \cdot \eta_{opt} \quad (3)$$

Nell'ambito del presente lavoro, ai fini del calcolo di η_{opt} , è stato costruito un modello di ray-tracing in Octave, che fornisce le prestazioni ottiche del collettore lineare Fresnel in funzione dell'angolo di incidenza θ_i e dell'angolo di incidenza trasversale θ_t (Tabella 3). Il modello proietta una serie di "pennelli" di radiazione sull'apertura del collettore primario a intervalli regolari; ciascun pennello è composto da una serie di raggi a diversa inclinazione che riproducono l'apertura angolare della radiazione solare (divergenza solare). Il modello adottato per la distribuzione angolare dei raggi solari è quello lambertiano (disco uniforme di radiazione). L'origine dei raggi solari è posta al di sopra del ricevitore, in modo da simulare l'ombreggiamento del campo solare dovuto al ricevitore stesso. Ciascun raggio proiettato viene seguito nella sua traiettoria attraverso i seguenti passi:

- se il raggio colpisce la parte superiore dello specchio secondario va perso; in caso contrario si procede al passo successivo;
- se il raggio non colpisce nessuno degli specchi primari (ad esempio perché cade negli intervalli tra essi) va perso; altrimenti si procede al passo seguente;

- se il raggio intercetta geometricamente più di uno specchio, si decide quale colpirà prima, tenendo conto in questo modo dell'ombreggiamento reciproco delle file di specchi;
- il raggio viene riflesso dallo specchio colpito;
- se il raggio riflesso viene intercettato da un altro specchio primario (blocking) va perso, in caso contrario si procede al passo seguente;
- il raggio viene seguito ricorsivamente attraverso le riflessioni del secondario, le riflessioni del tubo ricevitore e gli attraversamenti del tubo di vetro fino a che la sua energia non diviene trascurabile, o fino a che non viene disperso.

La presenza del tubo di vetro è trattata in approssimazione di vetro sottile, che quindi non altera la traiettoria del raggio, ma assorbe e disperde per riflessione una parte della radiazione; la parte assorbita è però ottenuta tenendo conto dello spessore del vetro e dell'angolo di incidenza, calcolando (in approssimazione di facce piane) la lunghezza del percorso del raggio all'interno del vetro e usando un modello di estinzione esponenziale.

Nel corso della simulazione, le potenze assorbite dal ricevitore, dal tubo di vetro e dal secondario (che ha riflettività inferiore a 1) vengono salvate in distribuzioni angolari (per i tubi) o lineari (per il secondario). Al termine della simulazione le distribuzioni risultanti danno l'intensità di potenza assorbita dai vari componenti. Integrando le distribuzioni sui relativi profili si ottiene la potenza assorbita (al metro) da ogni componente.

In Tabella 3 sono elencate le proprietà ottiche utilizzate per la simulazione.

Tabella 3. Proprietà ottiche usate nel modello ray-tracing.

Proprietà ottica	Valore
Riflettività specchi primari	0.92
Slope error specchi primari (gaussiano)	2 mrad
Riflettività specchio secondario	0.92
Trasmissività globale vetro	0.96
Indice di rifrazione vetro (parte reale)	1.5168
Coefficiente di estinzione vetro	0.208 m ⁻¹
Assorbanza superficie ricevitore	0.95

I calcoli sono stati eseguiti ponendo la DNI pari a 1 W/m². I valori ottenuti vanno quindi moltiplicati per la DNI per ottenere le intensità e le potenze assorbite.

La Figura 21 mostra le distribuzioni di radiazione assorbita sul ricevitore (a) e nel vetro (b), per $\theta_t = 0^\circ$, $\theta_i = 40^\circ$. In Tabella 4 si riportano i risultati ottenuti per diversi valori di θ_t e θ_i , per diverse quantità di interesse:

- valori normalizzati (cioè per DNI pari a 1 W/m²) della radiazione assorbita dal tubo ricevitore \dot{q}_{HCE} e della frazione y_{HCE} assorbita nella metà inferiore;
- valori normalizzati della radiazione \dot{q}_{glass} assorbita dal vetro e della relativa frazione y_{glass} assorbita nella metà inferiore;
- valori normalizzati della radiazione \dot{q}_{CPC} assorbita dal riflettore secondario.

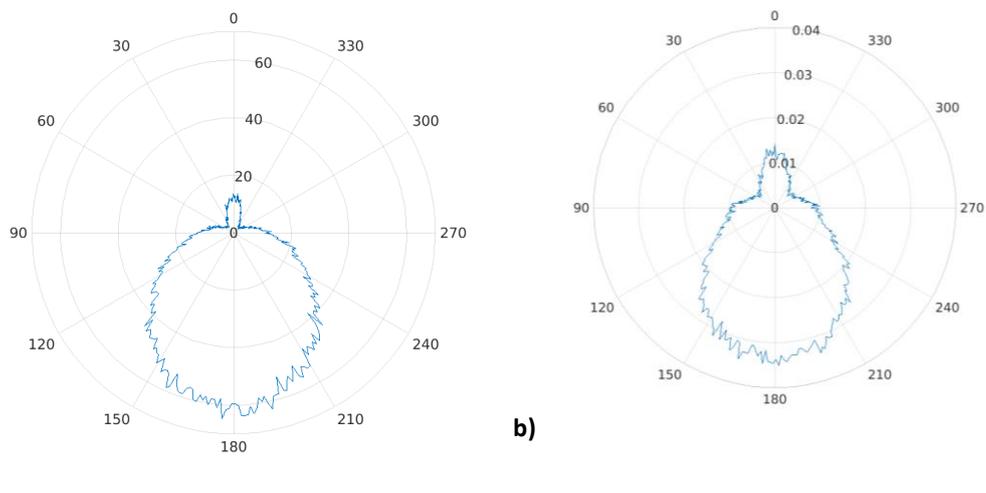


Figura 21. Distribuzioni angolari della radiazione assorbita a) dal tubo ricevitore e b) dal vetro, per $\theta_t = 0^\circ$, $\theta_i = 40^\circ$, $DNI = 1 \text{ W/m}^2$.

Tabella 4. Risultati ottenuti dal modello di ray-tracing per il collettore lineare Fresnel installato presso il CR ENEA Casaccia.

θ_t [°]	θ_i [°]	\dot{q}_{HCE} [W/m]	γ_{HCE} [-]	\dot{q}_{glass} [W/m]	γ_{glass} [-]	\dot{q}_{CPC} [W/m]
0.0	0.0	6.7425	0.8785	0.0072	0.7755	0.3165
0.0	20.0	6.3156	0.8750	0.0068	0.7707	0.3013
0.0	40.0	5.0386	0.8596	0.0057	0.7508	0.2829
0.0	60.0	3.0557	0.8055	0.0039	0.6914	0.2624
0.0	80.0	0.7068	0.5631	0.0011	0.5222	0.1466
20.0	0.0	6.6649	0.8758	0.0072	0.7689	0.3211
20.0	20.0	6.2255	0.8711	0.0068	0.7633	0.3154
20.0	40.0	4.9780	0.8589	0.0057	0.7468	0.2859
20.0	60.0	3.0164	0.8062	0.0039	0.6883	0.2602
20.0	80.0	0.6824	0.5747	0.0011	0.5265	0.1448
40.0	0.0	5.9312	0.8460	0.0067	0.7377	0.3292
40.0	20.0	5.5561	0.8440	0.0063	0.7357	0.3172
40.0	40.0	4.4465	0.8306	0.0052	0.7188	0.2819
40.0	60.0	2.7173	0.7877	0.0035	0.6718	0.2427
40.0	80.0	0.6231	0.5716	0.0010	0.5232	0.1310
60.0	0.0	4.1130	0.7814	0.0048	0.6769	0.2623
60.0	20.0	3.8497	0.7762	0.0046	0.6726	0.2478
60.0	40.0	3.0958	0.7685	0.0038	0.6621	0.2141
60.0	60.0	1.9146	0.7278	0.0025	0.6260	0.1708
60.0	80.0	0.4469	0.5527	0.0007	0.5078	0.0889
80.0	0.0	1.2775	0.5723	0.0019	0.5063	0.1296
80.0	20.0	1.1922	0.5690	0.0017	0.5042	0.1220
80.0	40.0	0.9513	0.5619	0.0014	0.4996	0.0998
80.0	60.0	0.5762	0.5368	0.0009	0.4829	0.0645
80.0	80.0	0.1217	0.4324	0.0002	0.4030	0.0150

Inoltre, per il calcolo dell'efficienza ottica globale, occorre considerare altri due fattori correttivi, η_{end} e η_g , di seguito riportati, che tengono conto, rispettivamente, delle perdite di bordo e dell'ombreggiamento degli schermi a protezione delle giunzioni vetro-metallo:

$$\eta_{end} = 1 - \frac{h \tan \theta_i}{L} \quad (4)$$

$$\eta_g = 1 - \frac{L_{schermi}}{L_{HCE}} \quad (5)$$

in cui h è l'altezza del ricevitore dal piano degli specchi primari, L la lunghezza del collettore solare, $L_{schermi}$ la lunghezza degli schermi e L_{HCE} la lunghezza del tubo ricevitore.

La potenza termica che può essere trasferita al fluido, HTF (Heat Transfer Fluid), P_{HTF} dipende dalle prestazioni termiche dei tubi ricevitori ossia dal loro rendimento termico η_{th} :

$$P_{HTF} = P_{HCE} \cdot \eta_{th} \quad (6)$$

Considerando le equazioni (1)-(6), la potenza termica trasferita al fluido può essere espressa come di seguito:

$$P_{HTF} = DNI \cdot IAM_i(\theta_i) \cdot IAM_t(\theta_t) \cdot A_{coll} \cdot \eta_{opt} \cdot \eta_{end}(\theta_i) \cdot \eta_g \cdot \eta_{th} \quad (7)$$

ovvero

$$P_{HTF} = DNI \cdot \dot{q}_{HCE}(\theta_i, \theta_t) \cdot L \cdot \eta_{end}(\theta_i) \cdot \eta_g \cdot \eta_{th} \quad (8)$$

L'efficienza totale del collettore, intesa come il rapporto tra la potenza termica trasferita al fluido e la radiazione normale incidente DNI, è quindi data da:

$$\eta_{tot} = IAM_i(\theta_i) \cdot IAM_t(\theta_t) \cdot \eta_{opt} \cdot \eta_{end}(\theta_i) \cdot \eta_g \cdot \eta_{th} \quad (9)$$

Per il bilancio termico della stringa di collettori, occorre risolvere il seguente sistema di equazioni per ogni singolo tubo ricevitore:

- Equazione della potenza termica:

$$P_{HCE} = P_{HTF} + P_{Loss} \quad (10)$$

- Equazione di conservazione dell'energia:

$$P_{HTF} = \Delta \dot{H} + \Delta \dot{E}_c \quad (11)$$

- Equazione dell'energia meccanica:

$$\int_1^2 v dp + \frac{u_2^2}{2} - \frac{u_1^2}{2} + Y = 0 \quad (12)$$

- Variazione di entalpia del fluido:

$$dH = c_p dT \quad (13)$$

- Equazione di continuità:

$$\rho u = costante \quad (14)$$

dove:

c_p :	Calore specifico a pressione costante ($J kg^{-1} K^{-1}$)
P_{HCE} :	Potenza termica assorbita dal tubo ricevitore (W)
P_{HTF} :	Potenza termica assorbita dal fluido termovettore (W)

P_{Loss} :	Potenza termica dispersa dal tubo ricevitore (W)
H :	Entalpia ($J kg^{-1}$)
ΔH :	Variazione di entalpia ($J kg^{-1}$)
ΔE_c :	Variazione di energia cinetica ($J kg^{-1} K^{-1}$)
u :	Velocità ($m s^{-1}$)
Q :	Energia termica assorbita dal fluido ($J kg^{-1}$)
R :	Costante universale dei gas, pari a $8.314 J mol^{-1} K^{-1}$
ρ :	Densità del fluido ($kg m^{-3}$)
T :	Temperatura del fluido (K)
v :	Volume specifico del fluido ($m^3 kg^{-1}$)
Y :	Perdite di carico ($J kg^{-1}$), valutate con la formula di Darcy-Weisbach [4].

Lo scambio di energia tra la superficie interna del tubo ricevitore e il fluido termovettore avviene per convezione, e può essere espressa attraverso la seguente relazione:

$$P_{HTF} = h_c d_i \pi (T_{ai} - T_{out}) \quad (15)$$

dove

T_{ai}	Temperatura interna del tubo assorbitore (K)
T_{out}	Temperatura dell'aria all'uscita del tubo assorbitore (K)
d_i	Diametro interno del tubo assorbitore (m)
h_c	Coefficiente di scambio termico convettivo ($W m^{-2} K$),

$$h_c = \frac{k}{d_i} Nu \quad (16)$$

k	Conducibilità termica dell'aria ($W m^{-1} K$)
Nu	Numero di Nusselt, valutato con la correlazione di Dittus-Boulter:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (17)$$

Re Numero di Reynolds, espresso come:

$$Re = \frac{\rho u d_i}{\mu} \quad (18)$$

Pr Numero di Prandtl, espresso come:

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (19)$$

μ Viscosità dinamica dell'aria ($Pa s$)

La conducibilità termica, la viscosità dinamica, i numeri di Reynolds, Prandtl e Nusselt, sono calcolati alla temperatura media del fluido tra la sezione di ingresso e quella di uscita del tubo.

Per valutare l'efficienza termica del ricevitore solare, nel presente lavoro è stato utilizzato un modello a parametri concentrati del collettore Fresnel, sviluppato in Matlab®, in cui il tubo ricevitore, del tipo incapsulato ed evacuato, è stato suddiviso in due sezioni per tener conto della presenza del concentratore secondario che si affaccia sulla metà superiore del tubo.

Facendo riferimento alla Figura 22, i bilanci termici per ogni superficie di scambio del sistema ricevitore possono essere schematizzati come di seguito:

- la radiazione solare assorbita dal tubo ricevitore, nelle due aliquote $\dot{q}_{3,sol,abs}$ e $\dot{q}_{7,sol,abs}$, viene in parte trasmessa per convezione al fluido termovettore, $\dot{q}_{2-1,conv}$ e $\dot{q}_{6-1,conv}$, e in parte trasmessa per conduzione attraverso lo spessore del tubo, $\dot{q}_{3-2,cond}$ e $\dot{q}_{7-6,cond}$;
- lo scambio termico tra tubo ricevitore e tubo di vetro è del tipo radiativo ($\dot{q}_{3-4,rad}$ e $\dot{q}_{7-8,rad}$), essendo trascurabile la componente convettiva per effetto del vuoto;
- nel tubo di vetro, la parete interna risulta più calda di quella esterna, e lo scambio termico avviene per conduzione dall'interno verso l'esterno ($\dot{q}_{4-5,cond}$ e $\dot{q}_{8-9,cond}$);
- per la sezione inferiore del tubo di vetro, si considera lo scambio convettivo e radiativo con l'ambiente esterno, $\dot{q}_{5-a,conv}$ e $\dot{q}_{5-a,rad}$;
- per la zona superiore del tubo di vetro, avviene uno scambio convettivo tra il vetro e il CPC ($\dot{q}_{9-10,conv}$), mentre per le perdite radiative, dato che l'alluminio del CPC ha una bassa emissività, la radiazione viene riflessa e dispersa in gran parte verso l'ambiente e non scalda il secondario; quindi, in prima approssimazione si considera lo scambio radiativo tra tubo di vetro e ambiente esterno $\dot{q}_{9-a,rad}$;
- per il CPC, il flusso termico in ingresso viene trasmesso per conduzione attraverso lo spessore del CPC ($\dot{q}_{10-11,cond}$) e infine disperso per convezione e radiazione verso l'ambiente esterno ($\dot{q}_{11-a,conv}$ e $\dot{q}_{11-a,rad}$).

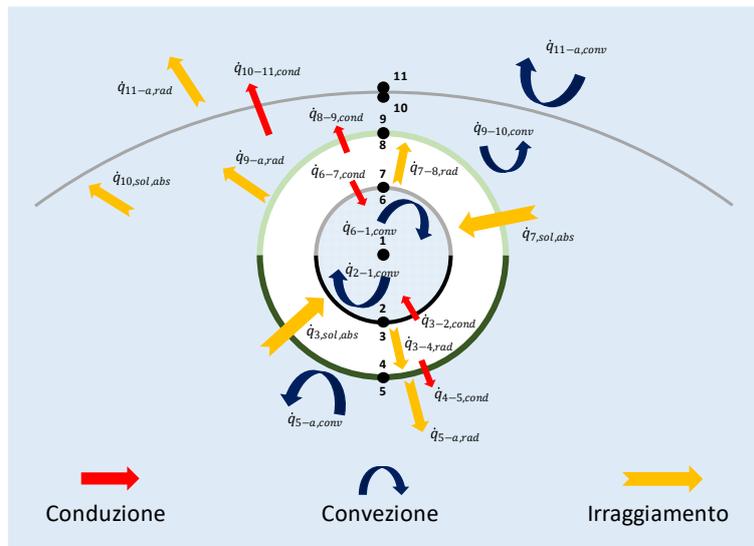


Figura 22. Flussi termici nel sistema ricevitore di un impianto Fresnel.

Applicando l'equazione di bilancio termico per ciascuna superficie della sezione del ricevitore, si ha:

$$\begin{aligned}
 \dot{q}_{2-1,conv} &= \dot{q}_{3-2,cond} \\
 \dot{q}_{3,sol,abs} &= \dot{q}_{3-2,cond} + \dot{q}_{3-4,rad} \\
 \dot{q}_{3-4,rad} &= \dot{q}_{4-5,cond} \\
 \dot{q}_{4-5,cond} &= \dot{q}_{5-a,conv} + \dot{q}_{5-a,rad} \\
 \dot{q}_{6-1,conv} &= \dot{q}_{6-7,cond} \\
 \dot{q}_{7,sol,abs} &= \dot{q}_{6-7,cond} + \dot{q}_{7-8,rad} \\
 \dot{q}_{7-8,rad} &= \dot{q}_{8-9,cond} \\
 \dot{q}_{8-9,cond} &= \dot{q}_{9-10,conv} + \dot{q}_{9-a,rad} \\
 \dot{q}_{9-10,conv} + \dot{q}_{10,sol,abs} &= \dot{q}_{10-11,cond} \\
 \dot{q}_{10-11,cond} &= \dot{q}_{11-a,conv} + \dot{q}_{11-a,rad}
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

Per determinare le prestazioni e le efficienze del collettore solare, il modello accetta in input i seguenti parametri:

- latitudine e longitudine dell'impianto;
- anno, mese, giorno e ora;
- radiazione normale diretta (DNI);
- grandezze geometriche del campo;
- ripartizione della radiazione solare riflessa dagli specchi primari tra il tubo ricevitore e il CPC;
- temperatura del fluido termovettore in ingresso e all'uscita del collettore solare;
- temperatura ambiente.

5 Prove sperimentali

Dopo aver effettuato le procedure di primo avviamento illustrate nei paragrafi 3.2 e 3.3, nella prima fase operativa sono state svolte prove di funzionalità dei singoli sottosistemi (riscaldatore elettrico, pompa ed aerotermi). Successivamente sono state effettuate prove sul circuito completo, sia in assenza di focalizzazione, lavorando con una temperatura fissa in ingresso all'Aeroterma AE1, sia con campo solare in focalizzazione, operando con una temperatura fissa in ingresso al campo solare. Per ogni condizione di prova, i test sono stati condotti in condizioni stazionarie per almeno 20 minuti.

5.1 Funzionalità sottosistemi

I primi test sperimentali condotti sull'impianto installato sono stati finalizzati a verificare le caratteristiche di funzionamento del riscaldatore elettrico. In particolare, le prime prove sono state svolte riscaldando alla temperatura massima operativa (320 °C) tutto il fluido termovettore contenuto nel circuito tra il buffer BUF.1C.01 e il riscaldatore stesso

Figura 23. In Figura 23 si riportano gli andamenti della temperatura del fluido in uscita dal riscaldatore elettrico (TE_1C_009) e di quella all'interno del buffer (TE_1C_008) registrate durante la prova: dopo aver raggiunto una temperatura di circa 320 °C, le resistenze elettriche del riscaldatore sono state spente e l'olio è stato mantenuto in circolazione.

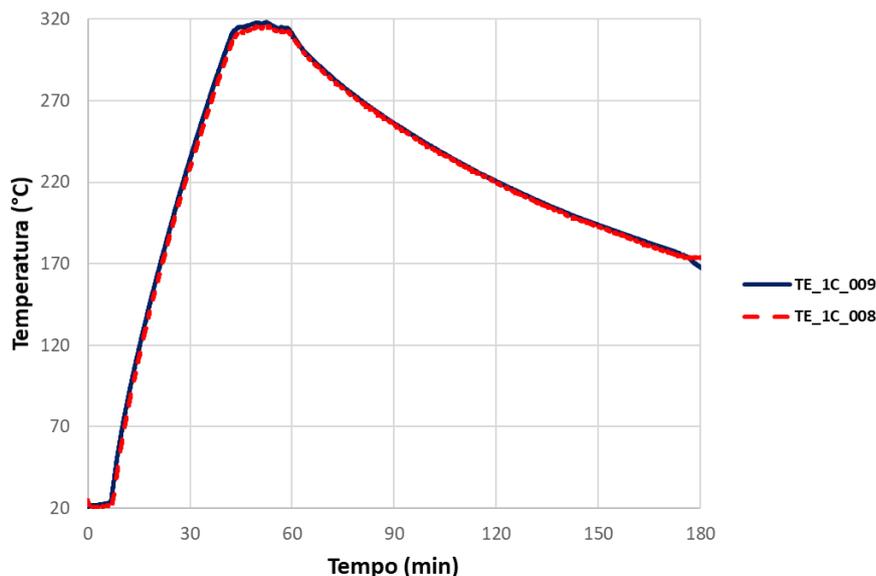


Figura 23. Andamento della temperatura del fluido in uscita dal riscaldatore elettrico (TE_1C_009) e della temperatura all'interno del buffer (TE_1C_008) durante una prova di riscaldamento.

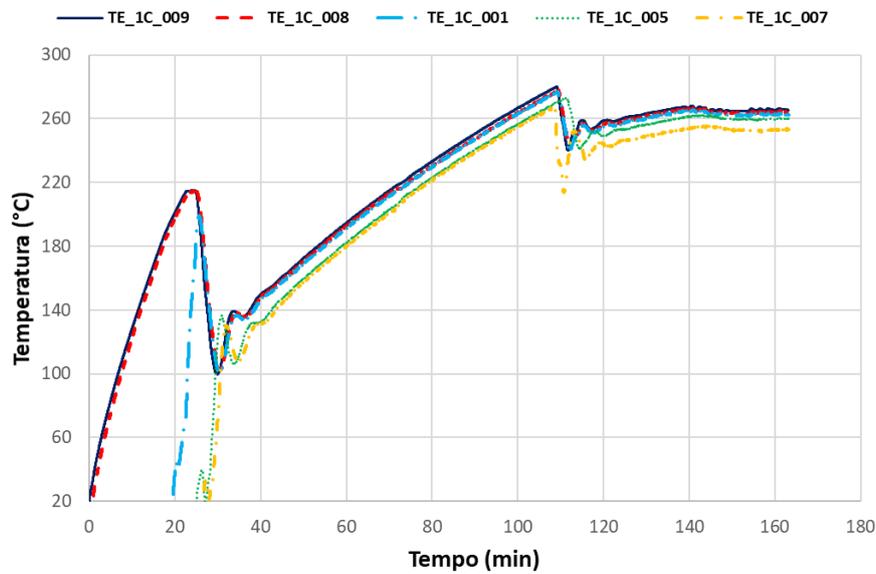
In Figura 24 e in Figura 25 si riporta l'andamento della temperatura controllata all'interno del circuito in corrispondenza, rispettivamente, di un normale avviamento e della fase di fermata e spegnimento dell'impianto. In entrambi i casi si riporta le temperature in uscita dal riscaldatore (TE_1C_009), all'interno del buffer (TE_1C_008), sulla mandata della pompa principale (TE_1C_001), in ingresso e in uscita all'aeroterma AE1 (TE_1C_005 e TE_1C_006) e in uscita dall'aeroterma AE2 (TE_1C_007), oltre alla regolazione della portata della pompa di ricircolo e della portata degli aerotermi.

Per quanto riguarda la fase di avviamento (Figura 24):

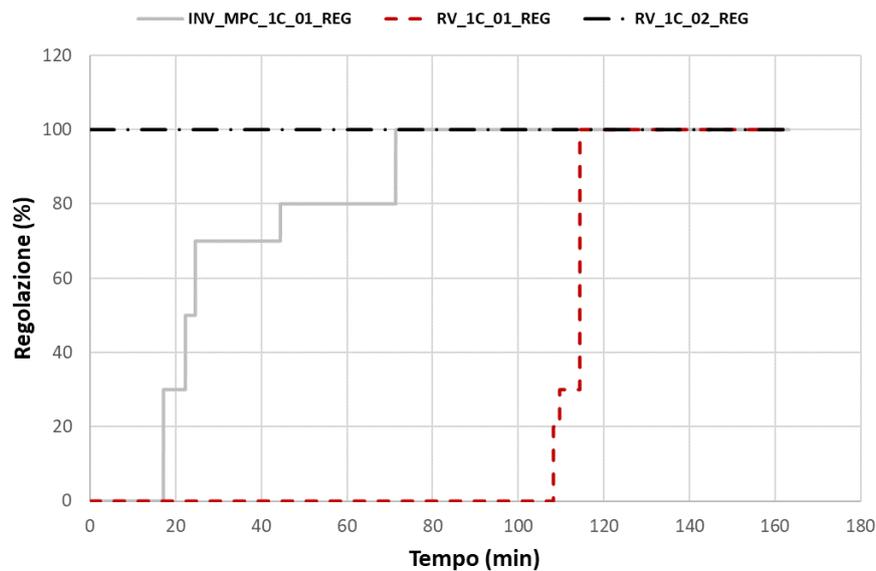
- si ha una prima fase in cui viene riscaldato solo l'olio contenuto nel riscaldatore e all'interno del buffer;

- dopo l'azionamento della pompa principale, mettendo in circolo l'olio ancora freddo contenuto nel circuito del campo solare, tutte le temperature subiscono un abbassamento;
- raggiunta una temperatura dell'olio omogenea, si ha una seconda fase di risalita delle temperature; l'incremento delle temperature in questa fase è più lenta perché la quantità di olio da riscaldare è maggiore rispetto alla fase iniziale, anche se la potenza del riscaldatore elettrico è al massimo;
- infine, le temperature si assestano dopo aver raggiunto il set-point prestabilito.

Per la procedura di spegnimento (Figura 25), i motori delle ventole presenti sui due aerotermi vengono progressivamente regolati fino alla massima velocità di rotazione mediante gli inverter. In circa 30 minuti, in tutti i punti dell'impianto l'olio ha una temperatura inferiore a 150 °C.

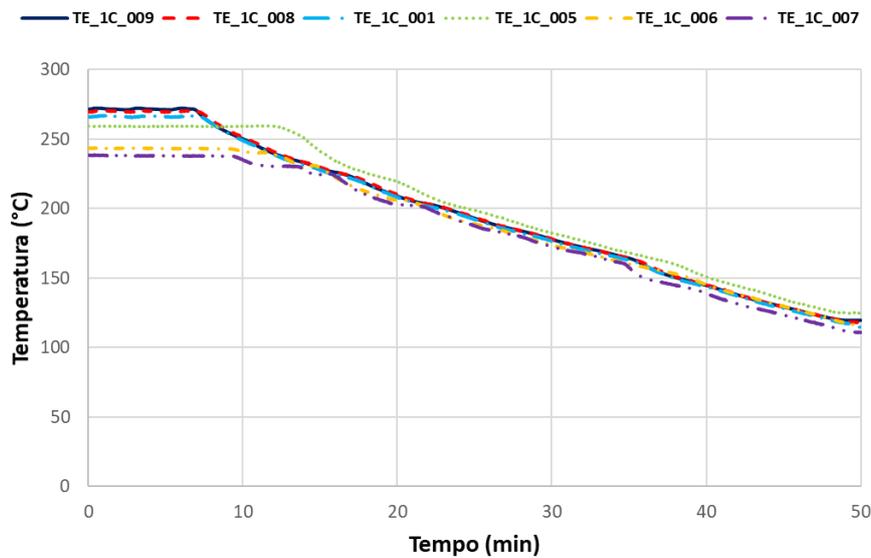


a)

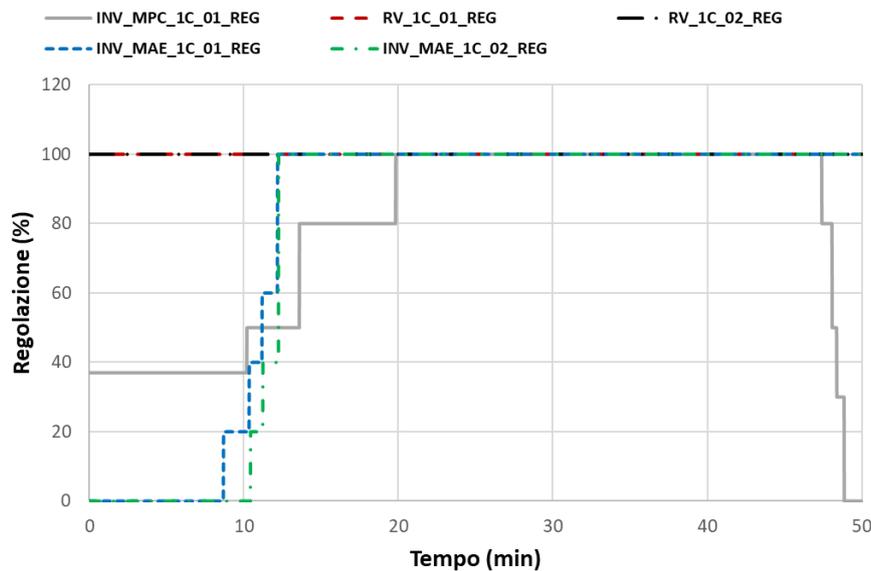


b)

Figura 24. Fase di riscaldamento durante un normale avviamento dell'impianto ENEA-SHIP: a) andamento delle temperature; b) regolazione dell'inverter della pompa principale e regolazione delle valvole a tre vie.



a)



b)

Figura 25. Fase di fermata e spegnimento dell’impianto ENEA-SHIP: a) andamento delle temperature; b) regolazione delle valvole a tre vie e regolazione degli inverter della pompa principale e delle ventole degli aerotermi.

La potenza scambiata dagli aerotermi dipende sia dalla temperatura a cui si opera, sia dalla velocità delle ventole. In convezione naturale (quindi senza azionare la ventola), ogni aerotermo riesce a scambiare una potenza di circa 28 e 31 kW per temperature operative, rispettivamente, di 260 e 290 °C. Per contenere le perdite termiche durante la fase di avviamento, sull’aerotermo AE2 sono state installate delle serrande che limitano le dispersioni per convezione: le potenze scambiate in questo caso sono pari a 9.8 e 11.5 kW, rispettivamente, per temperature del fluido pari a 260 e a 290 °C. In Figura 26 si riportano i dati sperimentali e previsionali della potenza scambiata da ogni aerotermo in funzione della temperatura operativa e della velocità delle ventole.

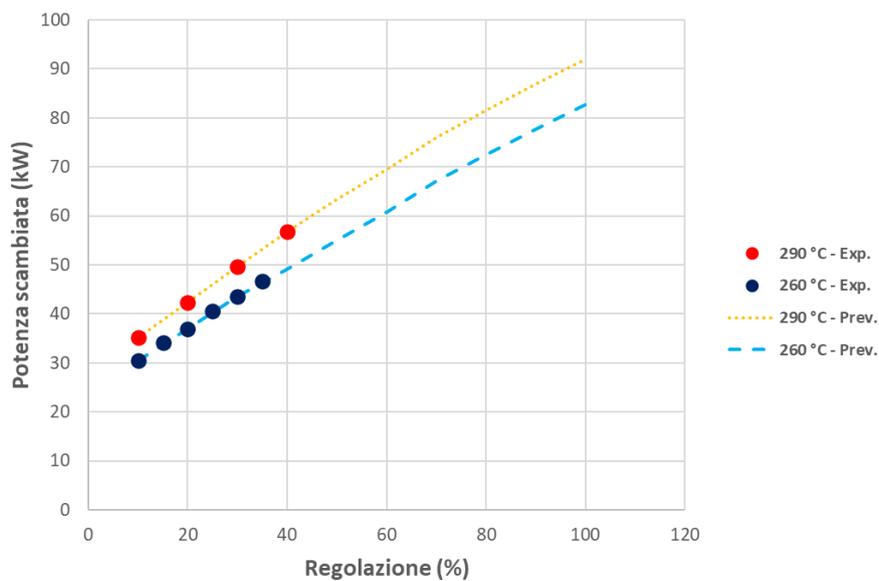


Figura 26. Potenza scambiata (dati sperimentali e previsionali) da un singolo aerotermo in funzione della regolazione della ventola e della temperatura operativa.

Per quanto riguarda la pompa di ricircolo, la curva caratteristica è stata ottenuta agendo sulla valvola di intercettazione a valle della pompa, operando al numero massimo di giri e alla temperatura di 190 °C, in corrispondenza della quale l'olio diatermico ha una viscosità dinamica paragonabile a quella dell'acqua (1 cSt). Altri punti di funzionamento della pompa sono stati ottenuti variando la velocità di rotazione della pompa mediante l'inverter, lavorando alla temperatura di 145 °C. In Figura 27 vengono riportati i punti ottenuti dalle prove: dalle misure effettuate si può rilevare che la portata si discosta del 5% rispetto alla portata nominale prevista.

Inoltre, in Figura 28, i dati sperimentali ottenuti sono stati confrontati con i punti di funzionamento determinati con la metodologia utilizzata nel Report relativo all'attività LA1.36 [5]. Per la stima delle perdite di carico sono state presi in considerazione gli elementi che determinano una perdita di carico localizzata e le lunghezze effettive dei vari tratti, riportati in Tabella 5.

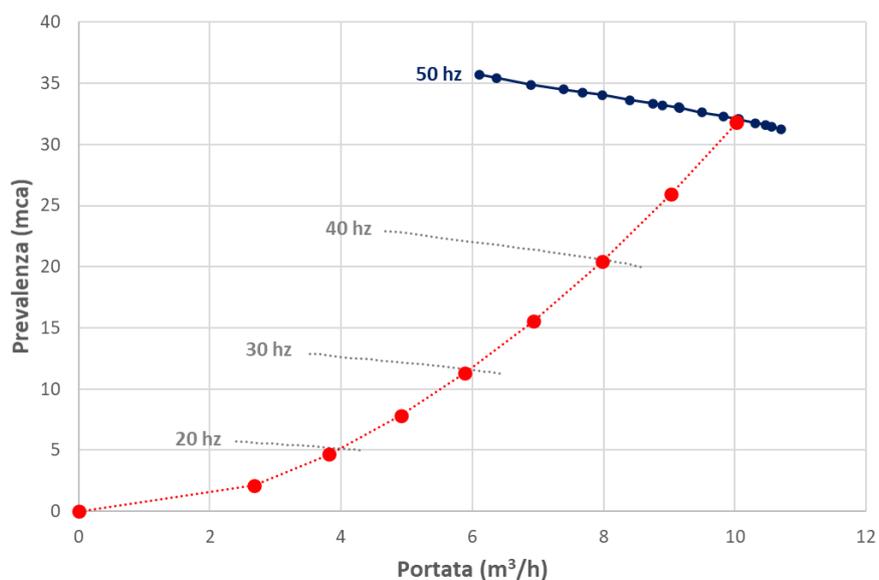


Figura 27. Curva caratteristica della pompa (in blu) con fluido a 190 °C e caratteristica del circuito (in rosso) del campo solare con olio diatermico a 145 °C.

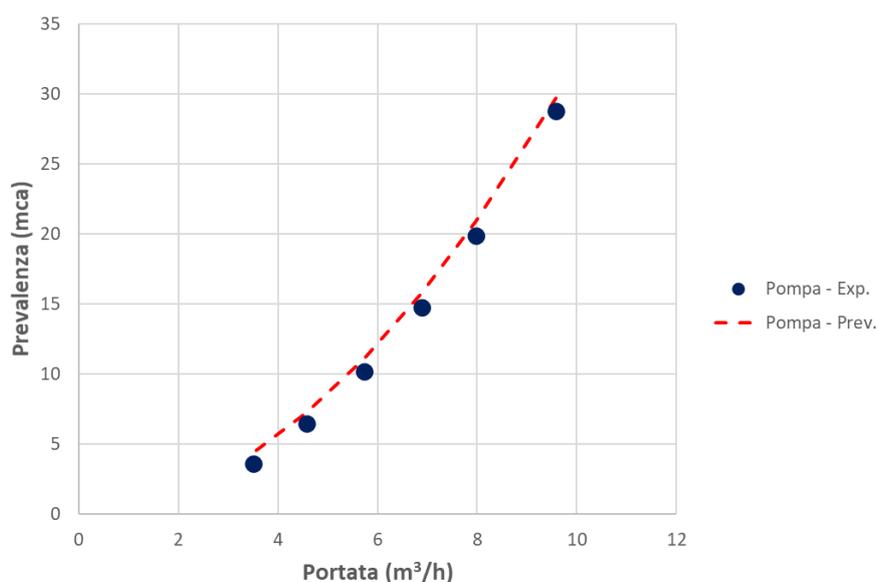


Figura 28. Confronto tra dati sperimentali e previsionali del funzionamento della pompa con olio a 260 °C.

Tabella 5. Descrizione dei tratti costituenti il circuito sperimentale.

Denominazione tratto da	a	Lunghezza (m)	Elementi di perdite di carico concentrate
Buffer	Pompa	2.16	1 uscita serbatoio + 2 gomiti 90°
Pompa	Uscita SKID	2.82	3 gomiti 90° + 1 riduzione di sezione + 1 aumento di sezione + 1 pozzetto termometrico
Uscita SKID	Ingresso collettore	66.21	5 gomiti 90° + 1 aumento di sezione + 1 pozzetto termometrico
Collettore		36.54	Nessuno
Uscita collettore	Ingresso SKID	18.98	8 gomiti 90° + 1 riduzione di sezione + 1 pozzetto termometrico
Ingresso SKID	V3V Aerotermi	3.76	1 valvola a 3 vie + 3 gomiti 90° + 1 pozzetto termometrico
V3V Aerotermi	Aerotermino 1	1.46	1 raccordo 90° + 1 aumento di sezione
Aerotermino 1		25.02	17 gomiti a U
Aerotermino 1	Punto miscelazione	1.20	1 riduzione di sezione + 1 raccordo a 90° + 1 pozzetto termometrico
V3V Aerotermi	Punto miscelazione	2.40	3 raccordi 90° + 1 T
Punto miscelazione	Aerotermino 2	1.40	1 gomito 90° + 1 aumento di sezione
Aerotermino 2		25.02	17 gomiti a U
Aerotermino 2	Buffer caldaia	7.65	1 riduzione di sezione + 5 gomiti 90° + 1 pozzetto termometrico + 1 ingresso serbatoio

5.2 Prove in assenza di focalizzazione

Le prove in assenza di focalizzazione sono state principalmente condotte per verificare il funzionamento del sistema di acquisizione e controllo: durante tali prove il riscaldatore elettrico è stato adoperato in modo da garantire una temperatura fissa del fluido termovettore (260 °C) in ingresso all'aerotermino AE1. Le prove sono state effettuate variando la portata del fluido termovettore (0.80, 1.05, 1.33, 1.60, 1.85 e 2.23 kg/s) e la potenza dell'aerotermino AE1 (attraverso l'inverter). A titolo di esempio in Figura 29 si riporta la prova effettuata con una portata di 1.6 kg/s e con l'inverter dell'aerotermino AE1 impostato al 10%. La temperatura

più alta che si registra è quella in uscita dal riscaldatore elettrico (TE_1C_009), che ha un andamento oscillatorio (tipo dente di sega): ciò è dovuto alle resistenze del riscaldatore che hanno un meccanismo di regolazione on-off per mantenere la temperatura di lavoro impostata. Anche la temperatura nel buffer (TE_1C_008) e in mandata pompa (TE_1C_001) presentano un andamento simile a quello del riscaldatore elettrico ma più attenuato, associato all'abbassamento della temperatura nel circuito per effetto delle dispersioni verso l'ambiente. Successivamente il fluido termovettore subisce una prima considerevole riduzione di temperatura nel passaggio dell'aerotermo AE1, proporzionale alla velocità della ventola, e un ulteriore raffreddamento nell'aerotermo AE2 (con serrande chiuse): nel caso in esame (vedi Tabella 9), la temperatura da 260 °C passa a 252.4 °C all'uscita di AE1 fino a 250.0 °C all'uscita di AE2. Pertanto, in tali condizioni, la temperatura nei due aerotermi si abbassa, rispettivamente, di circa 8.0 e 2.5 °C, con potenze scambiate di 30.42 e 9.62 kW_t.

Nelle tabelle di seguito riportate (da Tabella 6 a Tabella 11), vengono riportati i risultati delle prove effettuate a diversi valori di portata del fluido termovettore. In ciascuna di esse, sono indicati i parametri impostati per ogni prova (portata di olio, temperatura in ingresso all'aerotermo AE1 e regolazione della relativa ventola) con le temperature e le pressioni misurate: a partire da queste grandezze sono state ricavate la prevalenza H_{pompa} della pompa, la potenza P_{BUF} netta fornita dal riscaldatore al buffer, le potenze P_{AE1} e P_{AE2} scambiate dai due aerotermi e le dispersioni delle tubazioni q_{piping} . Inoltre, è stata calcolata anche la potenza P_{CS} del campo solare che, in condizioni di non focalizzazione, va intesa come potenza dispersa verso l'ambiente.

Naturalmente la potenza scambiata dagli aerotermi dipende dal livello termico del fluido e dalla regolazione della ventola. Ad esempio, con la ventola regolata al 30% e con una portata di olio pari a 2.23 kg/s, nell'aerotermo AE1 si scambia una potenza di circa 43 kW_t, ottenendo nel fluido termovettore un salto di circa 8 °C; mentre, riducendo la portata dell'olio a 0.80 kg/s, il fluido si raffredda di circa 22 °C. Per l'aerotermo AE2, che ha lavorato con le serrande chiuse, la potenza scambiata va da 9 a 11 kW_t.

Considerando che le dispersioni termiche lungo le tubazioni si attestano mediamente sui 75 W/m, il riscaldatore elettrico riesce a fornire al massimo una potenza termica netta di circa 67 kW_t. Pertanto, tenendo conto anche di un'efficienza di scambio termico tra le resistenze elettriche del riscaldatore e l'olio pari a 0.90, si può valutare una dispersione termica di circa 20 kW_t imputabile al riscaldatore stesso. A ciò si può ovviare migliorando la coibentazione sul corpo del riscaldatore riducendo le perdite termiche verso l'ambiente.

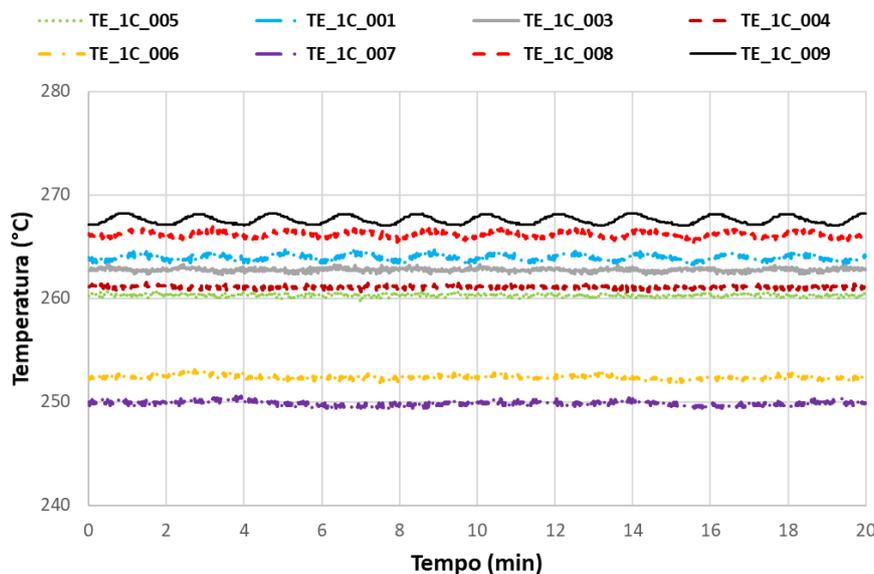


Figura 29. Andamento delle temperature nell'impianto ENEA-SHIP nella prova con portata di 1.6 kg/s e inverter dell'aerotermo AE1 impostato al 10%, in assenza di focalizzazione del campo solare.

Tabella 6. Prove in assenza di focalizzazione al variare della regolazione dell'inverter sull'aerotermo AE1: temperatura in ingresso all'aerotermo AE1 e portata di olio pari, rispettivamente, a 260 °C e 0.80 kg/s.

Prova	#	1	2	3	4	5	6
FT_1C_001	kg/s	0.79	0.81	0.82	0.82	0.82	0.82
FT_1C_001	m ³ /h	3.41	3.51	3.53	3.52	3.53	3.53
TE_1C_005	°C	259.4	259.8	260.2	260.0	260.6	260.9
INV_MAE_1C_01_REG	%	0	10	15	20	25	30
TE_1C_001	°C	266.5	266.3	266.6	266.8	267.0	265.1
TE_1C_003	°C	263.7	263.7	263.9	263.9	264.3	263.5
TE_1C_004	°C	259.8	260.2	260.9	260.6	261.1	261.1
TE_1C_006	°C	243.7	244.0	242.5	240.9	239.8	239.0
TE_1C_007	°C	238.4	239.1	237.5	235.9	234.8	234.2
TE_1C_008	°C	270.2	269.5	269.8	270.1	270.3	268.2
TE_1C_009	°C	271.7	270.7	270.6	271.2	271.4	269.2
PT_1C_010	°C	1.14	1.16	1.29	1.29	1.26	1.25
PT_1C_001	°C	1.47	1.52	1.65	1.64	1.62	1.61
H_{pompa}	mca	3.4	3.7	3.6	3.7	3.7	3.7
P_{BUF}	kW _t	52.94	52.96	56.70	60.15	62.73	60.21
P_{CS}	kW _t	7.49	6.79	5.92	6.60	6.37	4.63
P_{AE1}	kW _t	29.64	30.72	34.54	37.12	40.45	42.80
P_{AE2}	kW _t	9.67	9.39	9.48	9.53	9.45	9.08
q_{piping}	W/m	65.34	64.30	72.01	73.40	68.68	39.40

Tabella 7. Prove in assenza di focalizzazione a diverse regolazioni dell'inverter sull'aerotermo AE1: temperatura in ingresso all'aerotermo AE1 e portata di olio pari, rispettivamente, a 260 °C e 1.05 kg/s.

Prova	#	1	2	3	4	5	6
FT_1C_001	kg/s	1.08	1.06	1.04	1.06	1.06	1.06
FT_1C_001	m ³ /h	4.66	4.58	4.50	4.57	4.57	4.56
TE_1C_005	°C	259.6	260.1	260	260.2	260.1	259.3
INV_MAE_1C_01_REG	%	0	10	15	20	25	30
TE_1C_001	°C	264.6	265.2	265.1	265.2	265.4	264.4
TE_1C_003	°C	262.7	263.4	263.3	263.4	263.3	262.4
TE_1C_004	°C	260.1	260.9	260.7	260.9	261.0	260.0
TE_1C_006	°C	248.4	247.9	246.3	245.4	243.7	241.9
TE_1C_007	°C	244.7	244.0	242.4	241.6	239.9	238.2
TE_1C_008	°C	267.4	268.1	267.9	268.0	268.3	267.4
TE_1C_009	°C	268.7	269.7	269.5	269.4	269.4	268.9
PT_1C_010	°C	1.13	1.20	1.18	1.18	1.21	1.20
PT_1C_001	°C	1.79	1.83	1.81	1.81	1.84	1.82
H_{pompa}	mca	6.71	6.40	6.41	6.39	6.40	6.41
P_{BUF}	kW _t	51.56	54.15	57.58	60.00	64.65	66.25
P_{CS}	kW _t	6.99	6.51	6.66	6.34	6.03	6.31
P_{AE1}	kW _t	29.01	31.01	34.64	37.38	41.67	44.12
P_{AE2}	kW _t	9.45	9.90	9.69	9.61	9.33	9.00
q_{piping}	W/m	65.00	71.50	70.03	71.03	81.13	72.55

Tabella 8. Prove in assenza di focalizzazione a diverse regolazioni dell'inverter sull'aerotermo AE1: temperatura in ingresso all'aerotermo AE1 e portata di olio pari, rispettivamente, a 260 °C e 1.33 kg/s.

Prova	#	1	2	3	4	5	6	7
FT_1C_001	kg/s	1.33	1.32	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33
FT_1C_001	m ³ /h	5.74	5.70	5.73	5.74	5.75	5.74	5.74
TE_1C_005	°C	261.7	259.9	260.1	259.9	260.0	260.2	259.7
INV_MAE_1C_01_REG	%	0	10	15	20	25	30	35
TE_1C_001	°C	266.0	264.3	264.3	264.1	264.0	264.2	263.5
TE_1C_003	°C	264.6	262.8	262.9	262.6	262.6	262.8	262.2
TE_1C_004	°C	262.4	260.8	261.0	260.8	260.9	261.1	260.6
TE_1C_006	°C	252.4	250.2	249.3	248.1	247.2	246.4	245.1
TE_1C_007	°C	249.1	247.1	246.2	244.9	244.1	243.3	242.1
TE_1C_008	°C	268.4	266.7	266.7	266.4	266.4	266.6	265.9
TE_1C_009	°C	269.7	267.5	267.4	267.4	267.3	267.5	267.0
PT_1C_010	°C	1.12	1.23	1.21	1.19	1.18	1.18	1.17
PT_1C_001	°C	2.13	2.22	2.21	2.19	2.18	2.18	2.17
H_{pompa}	mca	10.26	10.14	10.13	10.15	10.17	10.18	10.18
P_{BUF}	kW _t	54.13	54.92	57.92	61.17	63.90	66.63	68.14
P_{CS}	kW _t	7.10	6.21	5.90	5.96	5.74	5.48	5.30
P_{AE1}	kW _t	29.73	30.94	34.61	37.64	40.90	44.03	46.84
P_{AE2}	kW _t	10.40	9.91	9.87	10.08	9.74	9.62	9.31
Q_{piping}	W/m	73.33	83.64	80.19	79.72	79.82	79.80	71.14

Tabella 9. Prove in assenza di focalizzazione a diverse regolazioni dell'inverter sull'aerotermo AE1: temperatura in ingresso all'aerotermo AE1 e portata di olio pari, rispettivamente, a 260 °C e 1.60 kg/s.

Prova	#	1	2	3	4	5	6
FT_1C_001	kg/s	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60
FT_1C_001	m ³ /h	6.87	6.89	6.88	6.89	6.88	6.89
TE_1C_005	°C	259.4	260.3	260.2	260.4	259.5	259.7
INV_MAE_1C_01_REG	%	0	10	15	20	25	30
TE_1C_001	°C	263.0	263.9	263.6	263.7	262.9	263.1
TE_1C_003	°C	261.8	262.8	262.5	262.7	261.8	262.0
TE_1C_004	°C	260.2	261.1	261.1	261.3	260.4	260.5
TE_1C_006	°C	252.4	252.4	251.5	251.0	249.2	248.4
TE_1C_007	°C	249.9	249.9	249.0	248.5	246.7	246.0
TE_1C_008	°C	265.3	266.2	265.7	265.8	265.1	265.2
TE_1C_009	°C	266.6	267.6	266.6	266.5	266.3	266.6
PT_1C_010	°C	1.07	1.08	1.17	1.17	1.14	1.08
PT_1C_001	°C	2.53	2.53	2.62	2.61	2.59	2.53
H_{pompa}	mca	14.82	14.80	14.73	14.73	14.75	14.80
P_{BUF}	kW _t	50.41	54.23	56.12	58.47	62.21	65.69
P_{CS}	kW _t	6.26	6.48	5.42	5.18	5.45	5.67
P_{AE1}	kW _t	26.87	30.42	33.40	36.16	39.72	43.28
P_{AE2}	kW _t	9.73	9.62	9.58	9.56	9.41	9.14
q_{piping}	W/m	78.84	82.04	82.14	80.57	81.20	80.82

Tabella 10. Prove in assenza di focalizzazione a diverse regolazioni dell'inverter sull'aerotermo AE1: temperatura in ingresso all'aerotermo AE1 e portata di olio pari, rispettivamente, a 260 °C e 1.85 kg/s.

Prova	#	1	2	3	4	5	6	7
FT_1C_001	kg/s	1.86	1.85	1.86	1.86	1.85	1.86	1.85
FT_1C_001	m ³ /h	8.00	7.98	7.99	7.99	7.98	7.98	7.93
TE_1C_005	°C	260.2	260.6	260.4	260.1	260.2	259.8	259.0
INV_MAE_1C_01_REG	%	0	10	15	20	25	30	35
TE_1C_001	°C	263.4	263.7	263.5	263.1	263.4	262.7	261.5
TE_1C_003	°C	262.4	262.8	262.7	262.3	262.5	261.9	260.8
TE_1C_004	°C	261.0	261.5	261.4	260.9	261.1	260.6	259.7
TE_1C_006	°C	254.3	254.0	252.9	251.9	251.1	250.0	248.5
TE_1C_007	°C	252.1	251.8	250.7	249.7	248.9	247.9	246.5
TE_1C_008	°C	265.4	265.6	265.5	265.1	265.3	264.6	263.4
TE_1C_009	°C	266.7	266.7	266.5	266.3	266.4	265.7	264.7
PT_1C_010	°C	1.04	1.10	1.10	1.07	1.06	1.04	1.02
PT_1C_001	°C	3.04	3.04	3.04	3.02	3.00	2.98	2.97
Prevalenza	mca	20.37	19.79	19.79	19.84	19.84	19.84	19.88
P_{BUF}	kW _t	50.59	53.36	57.44	59.80	64.59	66.18	66.74
P_{CS}	kW _t	6.40	5.83	6.13	6.05	6.28	5.97	5.18
P_{AE1}	kW _t	26.47	29.53	33.48	36.38	40.46	43.50	46.54
P_{AE2}	kW _t	9.67	9.73	9.98	9.64	9.88	9.48	8.93
q_{piping}	W/m	85.49	87.96	83.47	82.11	84.70	76.85	64.76

Tabella 11. Prove in assenza di focalizzazione a diverse regolazioni dell'inverter sull'aerotermo AE1: temperatura in ingresso all'aerotermo AE1 e portata di olio pari, rispettivamente, a 260 °C e 2.23 kg/s.

Prova	#	1	2	3	4	5	6
FT_1C_001	kg/s	2.22	2.24	2.22	2.22	2.23	2.23
FT_1C_001	m ³ /h	9.56	9.64	9.57	9.56	9.57	9.58
TE_1C_005	°C	259.7	260.0	260.0	260.1	256.3	257.2
INV_MAE_1C_01_REG	%	0	10	15	20	25	30
TE_1C_001	°C	262.5	262.8	263.0	263.0	259.1	259.7
TE_1C_003	°C	261.7	262.2	262.2	262.3	258.4	259.2
TE_1C_004	°C	260.7	260.8	260.8	261.0	257.2	258.1
TE_1C_006	°C	254.9	254.4	253.6	253.2	248.8	249.1
TE_1C_007	°C	253.0	252.4	251.5	251.1	246.8	247.2
TE_1C_008	°C	263.8	263.9	264.1	264.2	260.3	260.9
TE_1C_009	°C	265.6	266.5	266.3	266.1	262.1	262.7
PT_1C_010	°C	0.95	0.83	0.88	0.91	0.92	0.93
PT_1C_001	°C	3.78	3.66	3.70	3.72	3.75	3.75
H _{pompa}	mca	28.85	28.79	28.74	28.73	28.84	28.82
P _{BUF}	kW _t	50.96	56.33	61.53	64.13	66.01	67.27
P _{CS}	kW _t	5.43	7.29	7.60	7.29	6.52	6.08
P _{AE1}	kW _t	26.32	30.39	34.39	37.17	40.11	43.30
P _{AE2}	kW _t	9.74	10.67	11.09	11.06	10.66	9.95
q _{piping}	W/m	100.72	84.87	89.83	91.58	92.72	84.43

5.3 Prove in focalizzazione

Le prove con campo solare in focalizzazione (on-sun) sono state eseguite in condizioni tali da garantire una temperatura del fluido termovettore pari a 290 °C in ingresso al collettore solare. Le prove sono state effettuate con portata del fluido impostata su due valori (1.30 e 2.15 kg/s) e a differenti regolazioni dell'inverter sull'aerotermo AE1. Da Figura 30 a Figura 36 si riportano i risultati delle prove con il campo solare in focalizzazione, con a) gli andamenti della radiazione normale e della portata del fluido termovettore, b) gli andamenti della temperatura ambiente e della velocità del vento e c) gli andamenti delle temperature dell'olio nei vari punti dell'impianto. La temperatura in ingresso al campo solare in tutti i casi si attesta intorno a 290 °C (TE_1C_003), mentre la temperatura di uscita dipende dal calore assorbito dal tubo ricevitore (TE_1C_004). In uscita dal campo solare l'olio subisce una limitata riduzione della temperatura per effetto delle dispersioni verso l'ambiente, mentre, in corrispondenza dell'aerotermo AE1, che rappresenta l'utenza termica, l'olio si raffredda in maniera più significativa: nel passaggio dell'aerotermo AE1 la riduzione di temperatura è ovviamente proporzionale alla velocità della ventola.

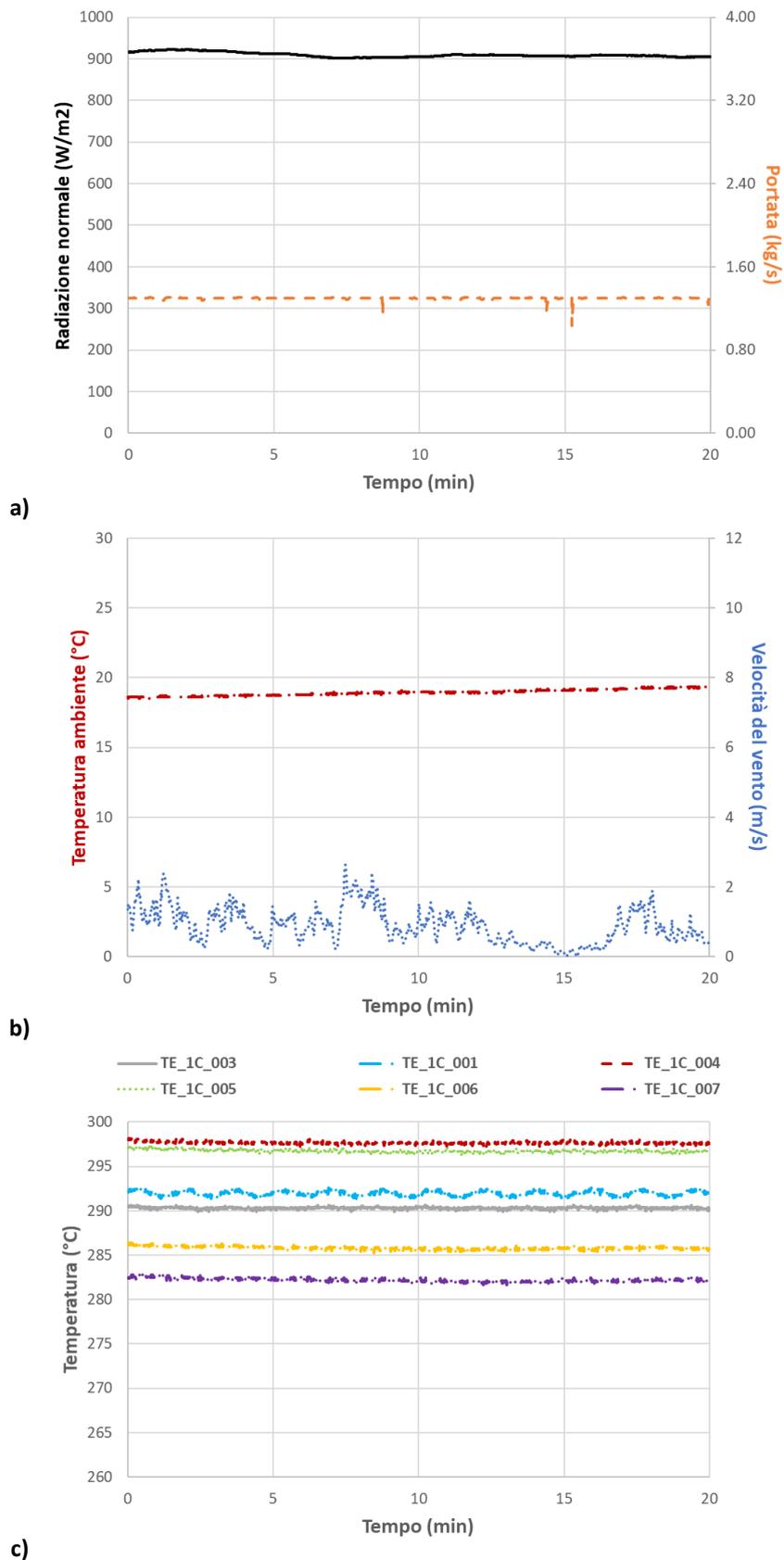


Figura 30. Prova con portata di olio pari a 1.30 kg/s e inverter dell'aerotermo AE1 al 10%, con campo solare in focalizzazione: a) andamento della radiazione normale e della portata; b) andamento della temperatura ambiente e della velocità del vento; c) andamento delle temperature del fluido nei vari punti dell'impianto.

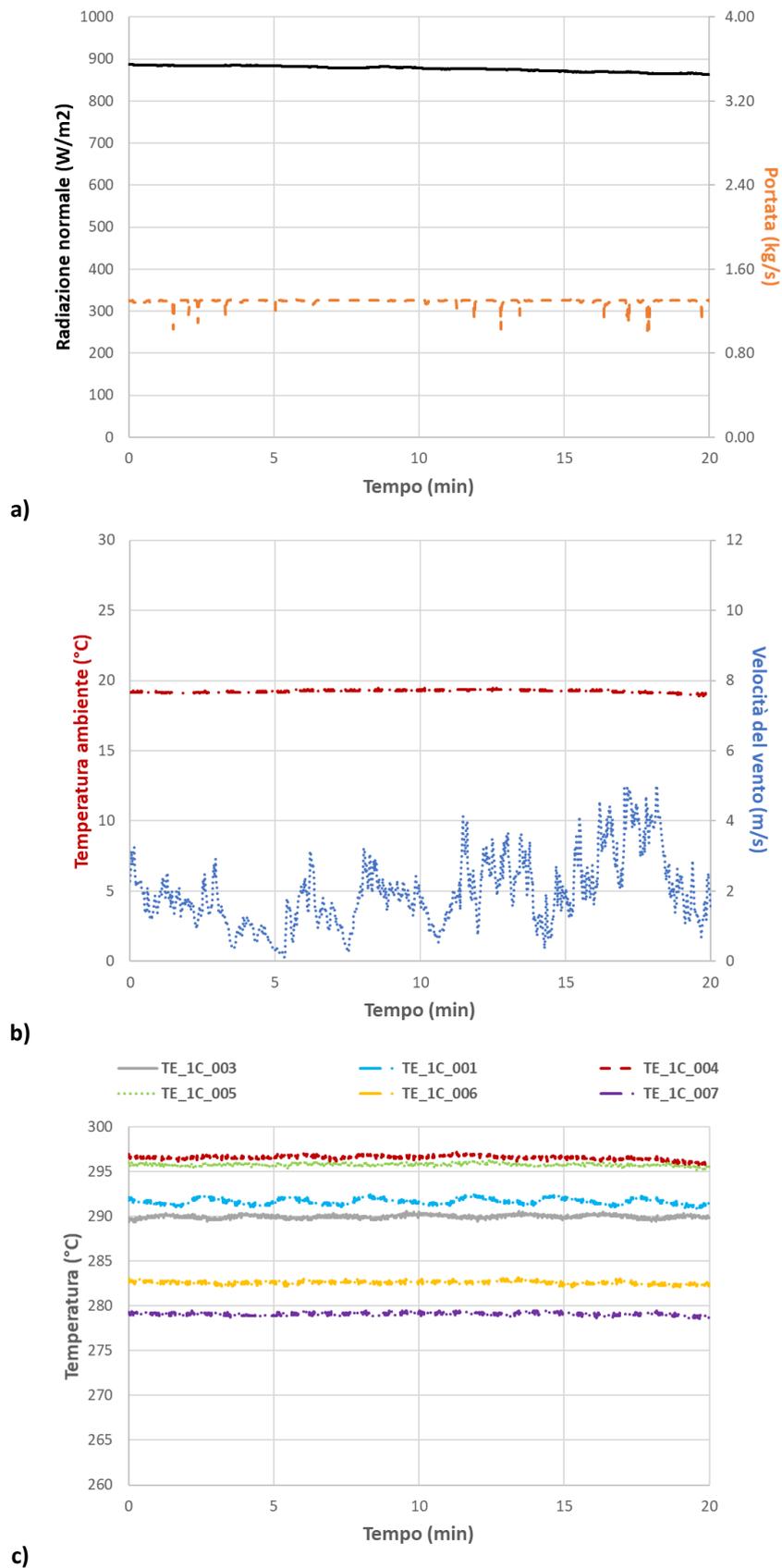


Figura 31. Prova con portata di olio pari a 1.30 kg/s e inverter dell'aeroterma AE1 al 20%, con campo solare in focalizzazione: a) andamento della radiazione normale e della portata; b) andamento della temperatura ambiente e della velocità del vento; c) andamento delle temperature del fluido nei vari punti dell'impianto.

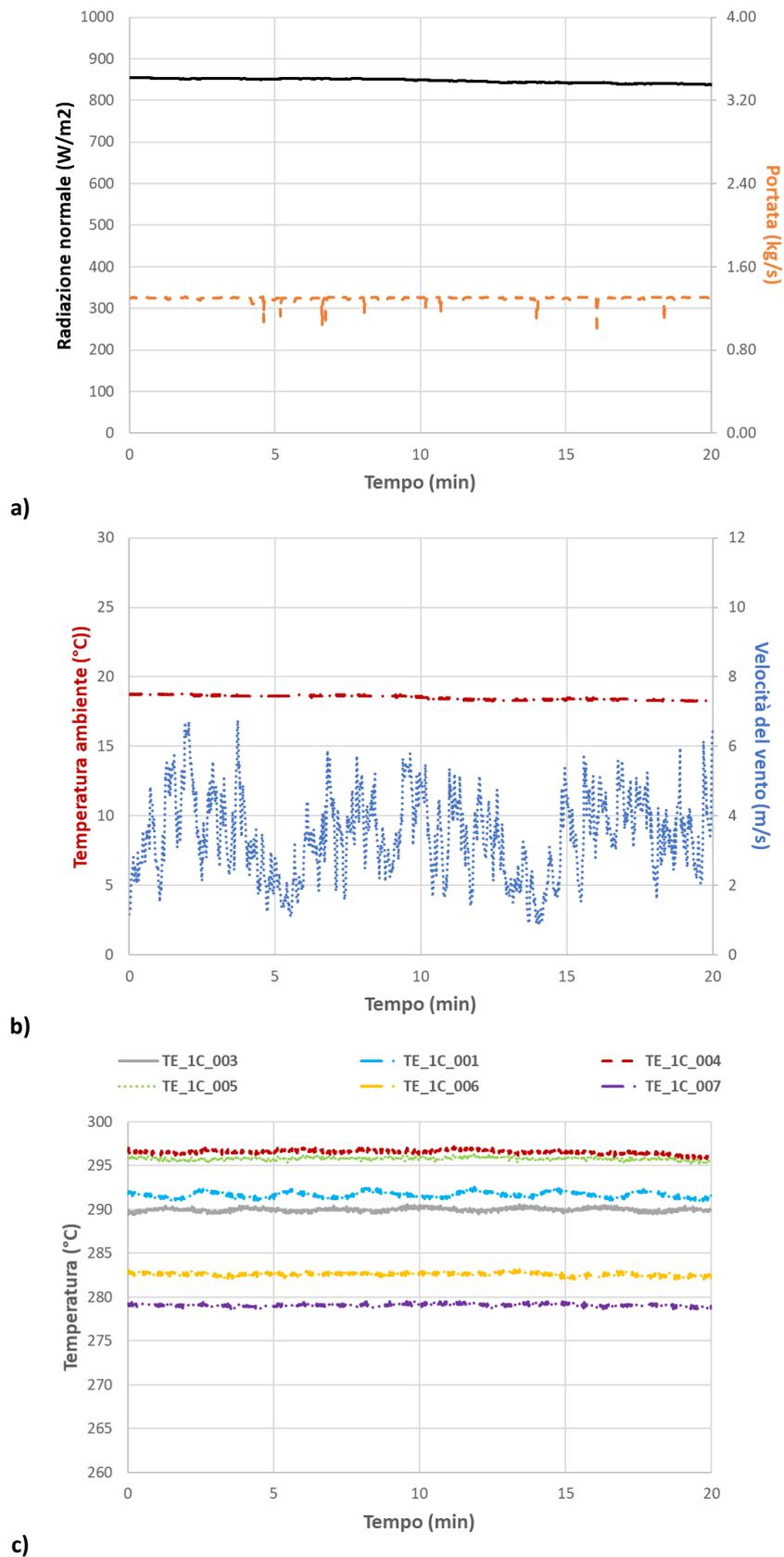


Figura 32. Prova con portata di olio pari a 1.30 kg/s e inverter dell'aerotermo AE1 al 30%, con campo solare in focalizzazione: a) andamento della radiazione normale e della portata; b) andamento della temperatura ambiente e della velocità del vento; c) andamento delle temperature del fluido nei vari punti dell'impianto.

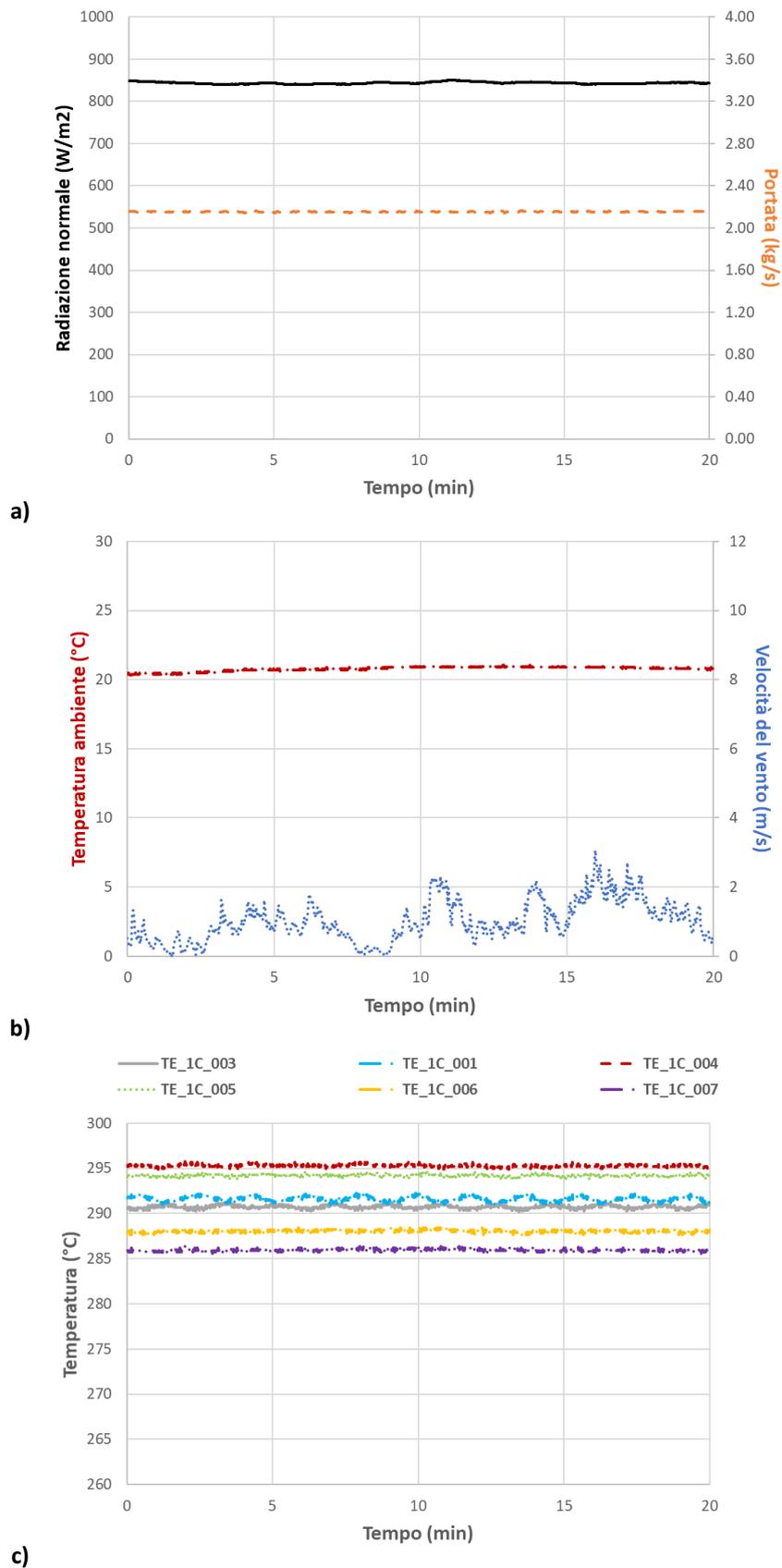


Figura 33. Prova con portata di olio pari a 2.15 kg/s e inverter dell'aeroterma AE1 al 10%, con campo solare in focalizzazione: a) andamento della radiazione normale e della portata; b) andamento della temperatura ambiente e della velocità del vento; c) andamento delle temperature del fluido nei vari punti dell'impianto.

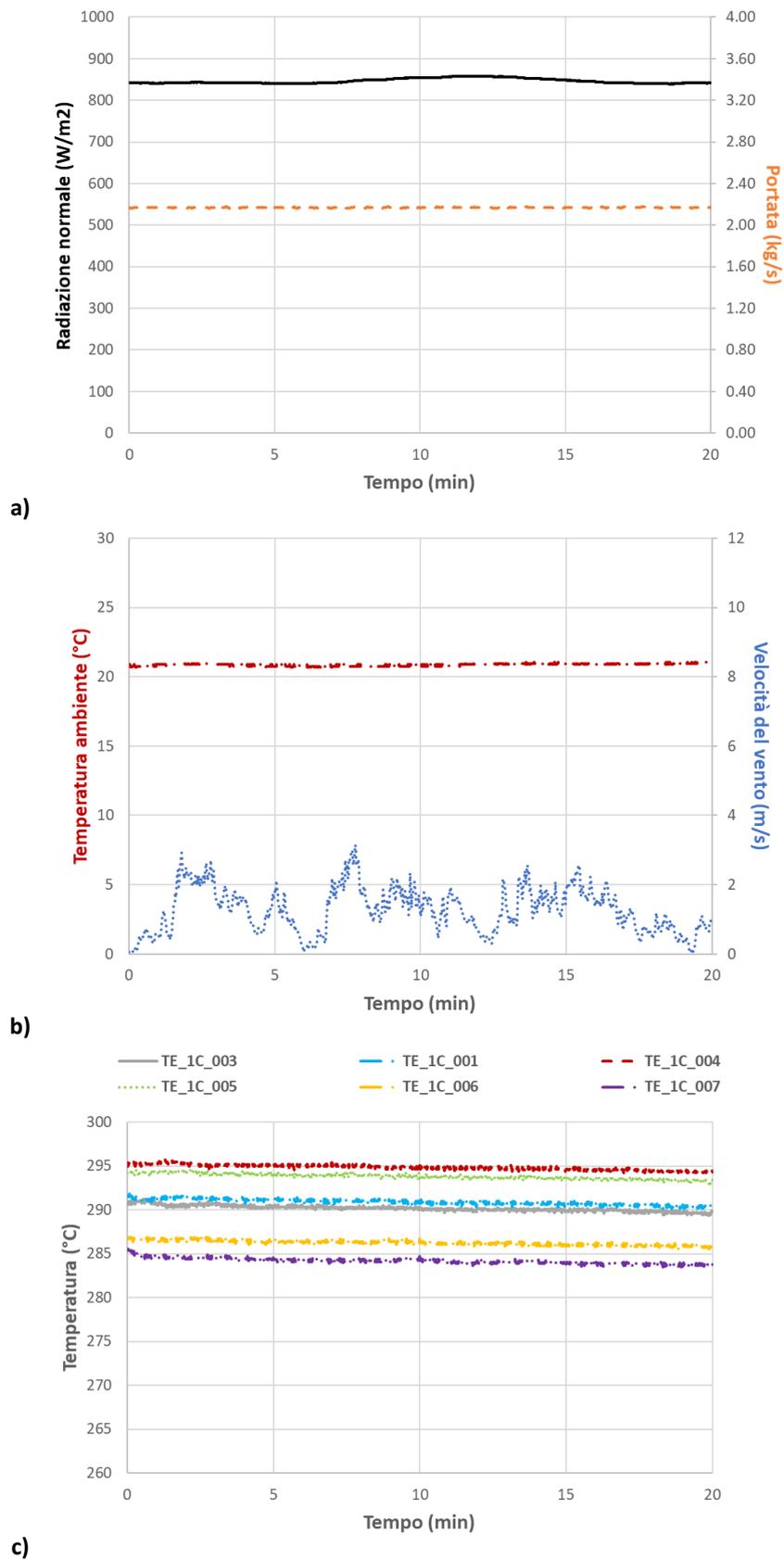


Figura 34. Prova con portata di olio pari a 2.15 kg/s e inverter dell'aerotermo AE1 al 20%, con campo solare in focalizzazione: a) andamento della radiazione normale e della portata; b) andamento della temperatura ambiente e della velocità del vento; c) andamento delle temperature del fluido nei vari punti dell'impianto.

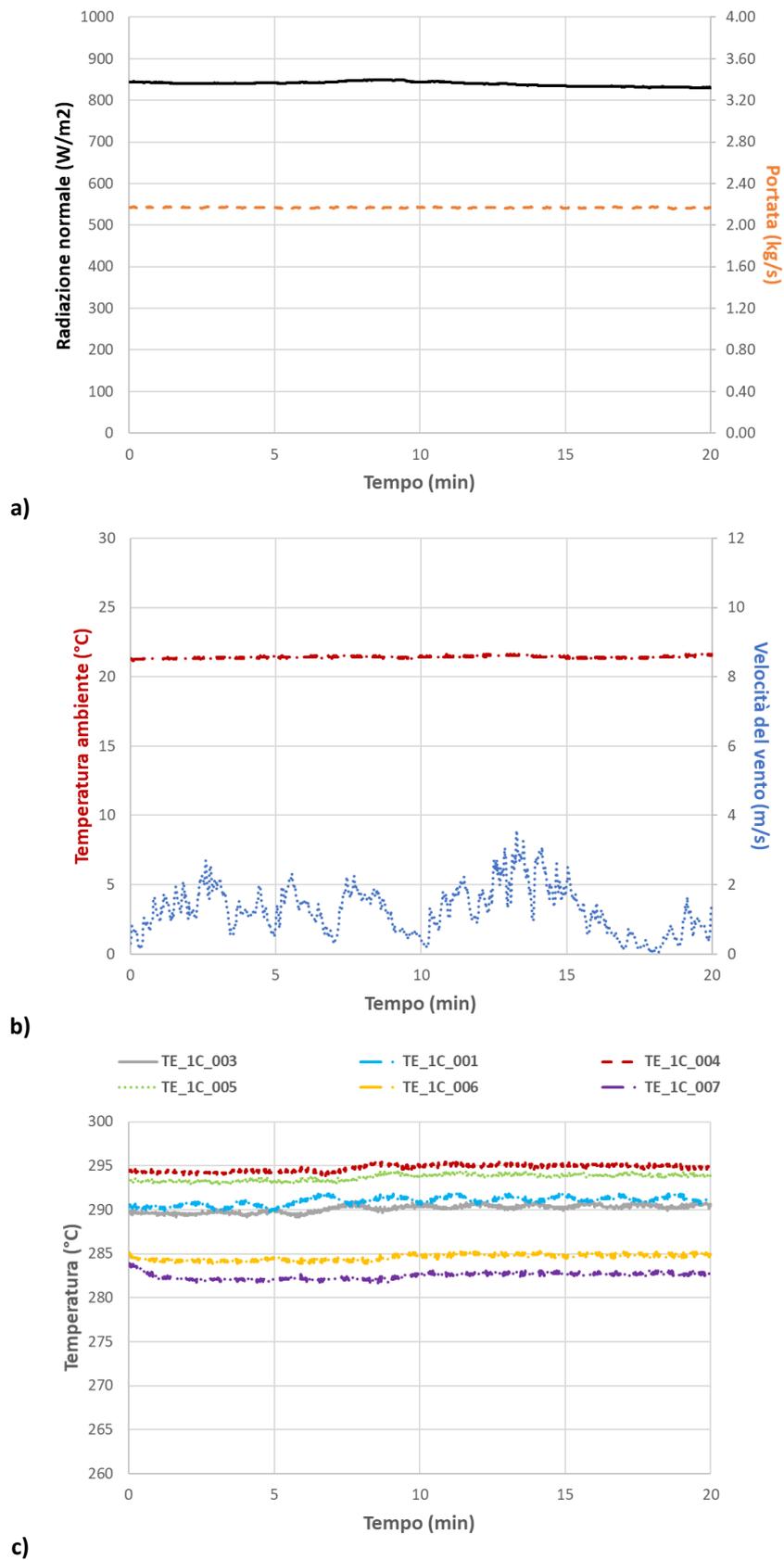


Figura 35. Prova con portata di olio pari a 2.15 kg/s e inverter dell'aeroterma AE1 al 30%, con campo solare in focalizzazione: a) andamento della radiazione normale e della portata; b) andamento della temperatura ambiente e della velocità del vento; c) andamento delle temperature del fluido nei vari punti dell'impianto.

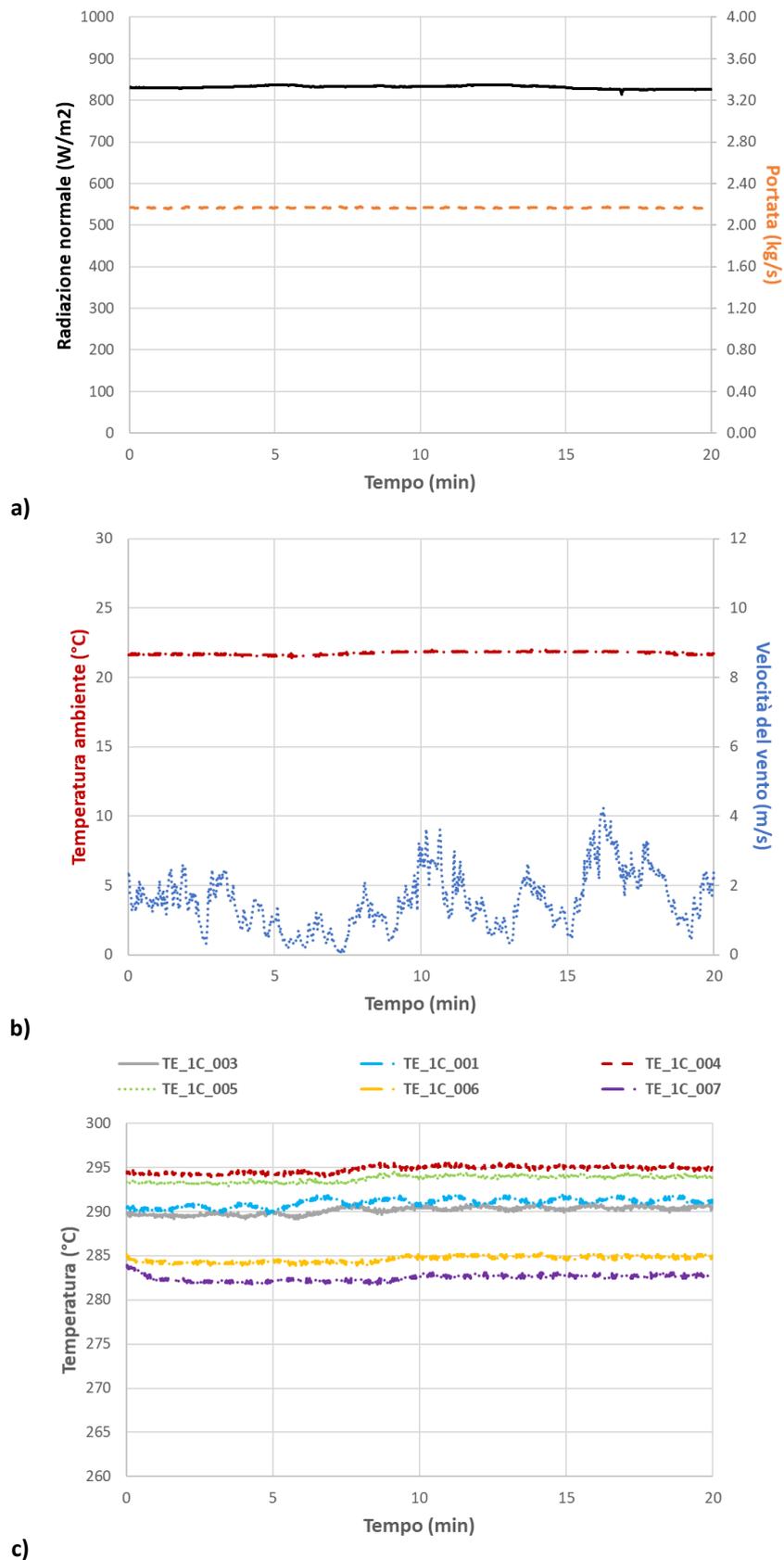


Figura 36. Prova con portata di olio pari a 2.15 kg/s e inverter dell'aerotermo AE1 al 40%, con campo solare in focalizzazione: a) andamento della radiazione normale e della portata; b) andamento della temperatura ambiente e della velocità del vento; c) andamento delle temperature del fluido nei vari punti dell'impianto.

In Tabella 12 e Tabella 13, vengono riportati i risultati delle prove effettuate con il campo solare in focalizzazione. In ciascuna di esse, sono indicate le condizioni ambientali di prova in termini di radiazione normale, temperatura ambiente e velocità del vento; inoltre, nelle stesse Tabelle, sono specificati i parametri impostati per ogni prova (portata di olio, temperatura in ingresso al collettore solare e regolazione della relativa ventola) con le temperature e le pressioni misurate: a partire da queste grandezze è stata ricavata la prevalenza H_{pompa} della pompa, il salto di temperatura ΔT_{CS} ottenuto nel campo solare, la potenza P_{BUF} netta fornita dal riscaldatore al buffer, la potenza P_{CS} termica assorbita dal fluido termovettore nel campo solare, le potenze P_{AE1} e P_{AE2} scambiate dai due aerotermini e le dispersioni delle tubazioni q_{piping} . Inoltre, nelle Tabelle si riporta il rendimento totale misurato η_{tot} del collettore, il rendimento totale stimato $\eta_{tot,est}$ mediante il modello previsionale, lo scarto percentuale $\Delta\eta_{tot}$ tra il rendimento totale delle prove sperimentali e quello stimato e, infine, il rendimento termico stimato del collettore ($\eta_{th,est}$).

Dai risultati ottenuti, la potenza netta fornita dal campo solare è piuttosto limitata (al massimo circa 25 kW_t) che equivale, in condizioni idonee, ad un salto termico di circa 7 °C. Le prestazioni del collettore solare, che è di tipo sperimentale con un design molto leggero, si discostano dai valori ottenuti dal modello previsionale descritto nei precedenti paragrafi con scarti percentuali del rendimento piuttosto significativi. Ciò è sostanzialmente indice di una attuale bassa qualità ottica del sistema, condizionata da diversi fattori, tra cui:

- Proprietà ottiche (riflettività) limitate degli specchi primari e del ricevitore secondario;
- Errore di curvatura degli specchi primari;
- Errore di forma del ricevitore secondario;
- Errori di allineamento degli specchi;
- Errori di inseguimento solare degli specchi.

Tabella 12. Prove con collettore solare in focalizzazione a diverse regolazioni dell'inverter sull'aerotermo AE1: temperatura in ingresso al collettore e portata di olio pari, rispettivamente, a 290 °C e 1.30 kg/s.

Prova	#	1	2	3	4	5	6
DNI	W/m ²	909.38	876.78	848.10	613.34	557.71	458.67
Temperatura ambiente	°C	18.94	19.24	18.54	20.13	19.77	19.84
Velocità del Vento	m/s	0.89	1.96	3.41	1.53	2.87	2.02
FT_1C_001	kg/s	1.30	1.30	1.30	1.31	1.31	1.31
FT_1C_001	m ³ /h	5.74	5.73	5.73	5.80	5.80	5.79
TE_1C_003	°C	290.29	289.99	290.37	291.36	291.28	288.08
INV_MAE_1C_01_REG	%	10	20	30	10	20	30
TE_1C_001	°C	291.97	291.68	292.05	293.11	292.81	289.37
TE_1C_004	°C	297.67	296.56	295.76	296.22	295.24	291.13
TE_1C_005	°C	296.75	295.80	295.07	295.27	294.35	290.38
TE_1C_006	°C	285.81	282.62	279.39	284.33	281.28	275.46
TE_1C_007	°C	282.21	279.10	275.80	280.72	277.63	272.16
TE_1C_008	°C	294.40	294.26	294.77	295.68	295.35	291.94
TE_1C_009	°C	295.47	295.75	296.25	296.71	296.41	293.21
PT_1C_010	°C	1.22	1.18	1.13	1.19	1.16	1.11
PT_1C_001	°C	2.20	2.16	2.11	2.17	2.14	2.10
H_{pompa}	mca	9.97	9.99	10.00	10.07	10.05	10.09
ΔT_{CS}	°C	7.4	6.6	5.4	4.9	4.0	3.1
P_{BUF}	kW _t	31.91	40.99	52.83	40.89	49.96	56.37
P_{CS}	kW _t	24.40	21.67	17.78	16.19	13.21	10.16
η_{tot}	%	8.1	7.4	6.3	8.0	7.1	6.7
η_{tot,est}	%	51.4	48.1	39.7	51.4	49.8	48.4
Δη_{tot}	%	-84.3	-84.5	-84.1	-84.8	-85.7	-86.2
η_{th,est}	%	97.1	97.0	96.6	96.5	96.2	95.7
P_{AE1}	kW _t	26.32	30.39	34.39	37.17	40.11	43.30
P_{AE2}	kW _t	9.74	10.67	11.09	11.06	10.66	9.95
Q_{piping}	W/m	100.72	84.87	89.83	91.58	92.72	84.43

Tabella 13. Prove con collettore solare in focalizzazione a diverse regolazioni dell'inverter sull'aerotermo AE1: temperatura in ingresso al collettore e portata di olio pari, rispettivamente, a 290 °C e 2.15 kg/s.

Prova	#	1	2	3	4	5	6
DNI	W/m ²	843.40	846.34	839.46	831.93	759.38	613.82
Temperatura ambiente	°C	20.76	20.87	21.42	21.74	18.67	19.08
Velocità del Vento	m/s	1.03	1.27	1.44	1.37	1.23	1.49
FT_1C_001	kg/s	2.17	2.17	2.17	2.17	2.12	2.12
FT_1C_001	m ³ /h	9.58	9.58	9.58	9.58	9.31	9.30
TE_1C_003	°C	290.75	290.18	290.26	290.38	291.19	290.98
INV_MAE_1C_01_REG	%	10	20	30	40	10	20
TE_1C_001	°C	291.63	290.90	291.16	291.22	291.99	291.74
TE_1C_004	°C	295.30	294.84	294.87	294.78	292.92	292.31
TE_1C_005	°C	294.24	293.82	293.81	293.77	291.87	291.30
TE_1C_006	°C	288.05	286.26	284.68	283.39	285.54	283.59
TE_1C_007	°C	285.96	284.19	282.52	281.26	283.34	281.32
TE_1C_008	°C	293.06	292.34	292.53	292.65	293.39	293.10
TE_1C_009	°C	294.40	293.85	294.31	294.51	294.71	294.43
PT_1C_010	°C	0.96	0.94	0.93	0.92	1.06	1.04
PT_1C_001	°C	3.65	3.64	3.62	3.61	3.61	3.59
H _{pompa}	mca	27.47	27.48	27.46	27.45	26.05	26.06
ΔT _{CS}	°C	4.6	4.7	4.6	4.4	1.7	1.3
P _{BUF}	kWt	31.07	36.71	47.22	54.38	46.22	55.68
P _{CS}	kWt	25.10	25.72	25.38	24.22	9.29	7.20
η _{tot}	%	9.0	9.2	9.1	8.8	3.7	3.5
η _{tot,est}	%	50.6	51.6	50.8	50.0	52.2	53.6
Δη _{tot}	%	-82.3	-82.3	-82.1	-82.4	-92.9	-93.4
η _{th,est}	%	97.5	97.6	97.5	97.5	97.4	97.0
P _{AE1}	kWt	34.06	41.55	50.11	56.86	33.86	41.22
P _{AE2}	kWt	11.43	11.29	11.76	11.55	11.69	12.08
Q _{piping}	W/m	4.83	3.95	4.92	4.61	4.30	4.11

6 Possibili azioni di ottimizzazione e revisione progettuale

Come descritto nei precedenti paragrafi, dal commissioning e dall'esercizio dell'impianto sono emersi alcuni limiti progettuali dei componenti e del sistema meritevoli di analisi e revisione, al fine di supportare l'identificazione di soluzioni tecniche efficaci che possano essere trasferite all'industria.

Il principale discostamento tra prestazioni previste e misurate è ascrivibile al collettore solare, che è di tipo sperimentale e che al momento sembra presentare una limitata qualità ottica, con una conseguente riduzione media del rendimento globale del campo solare compreso tra 80 e 90%. Dall'analisi sperimentale dei singoli sotto-componenti (specchi primari, concentratore secondario, tubo ricevitore), si può attribuire all'erroneo allineamento degli specchi primari il maggiore contributo allo scostamento dall'idealità. In particolare, la possibilità di movimentare autonomamente le diverse file di specchi, che introduce una notevole flessibilità operativa nella gestione dell'impianto con la parziale focalizzazione del campo solare, può al contempo comportare una maggiore complessità nella fase di calibrazione/allineamento degli specchi e nel corretto puntamento. Nel futuro sarà pertanto necessario disinstallare e reinstallare alcuni moduli riflettenti per migliorare la prestazione ottica dell'attuale collettore, mentre, in vista di possibili applicazioni commerciali della tecnologia SHIP, andrà valutato, caso per caso, il vantaggio derivante dalla movimentazione autonoma di ciascuna fila di specchi a fronte di una maggiore complessità nella fase di commissioning e nel normale esercizio di impianto.

Relativamente al campo solare, si suggerisce anche la revisione degli attuali ancoraggi degli specchi, che bloccano la rotazione rispetto al piano orizzontale a soli $\pm 45^\circ$, rendendo praticamente impossibile l'accesso tra le file di specchi e l'esecuzione delle operazioni manuali di pulizia delle superfici riflettenti.

Inoltre, si suggerisce di inserire un ulteriore sfiato all'ingresso del campo solare per evitare la formazione di sacche d'aria nella fase di avviamento, soprattutto nel caso in cui il collettore non sia perfettamente in piano. Difatti, nell'avviamento giornaliero del circuito, è stata rilevata un'incoerente lettura della temperatura all'ingresso del campo solare, imputabile alla presenza di sacche d'aria.

In corso d'opera è stato invece possibile implementare alcune migliorie, quali:

- Integrazione di uno schermo di protezione sulla termocoppia in uscita dal collettore solare (TE_1C_004, Figura 37a);
- Applicazione di un sistema a carrucola per il sostegno della tubazione in ingresso al collettore solare (Figura 38).

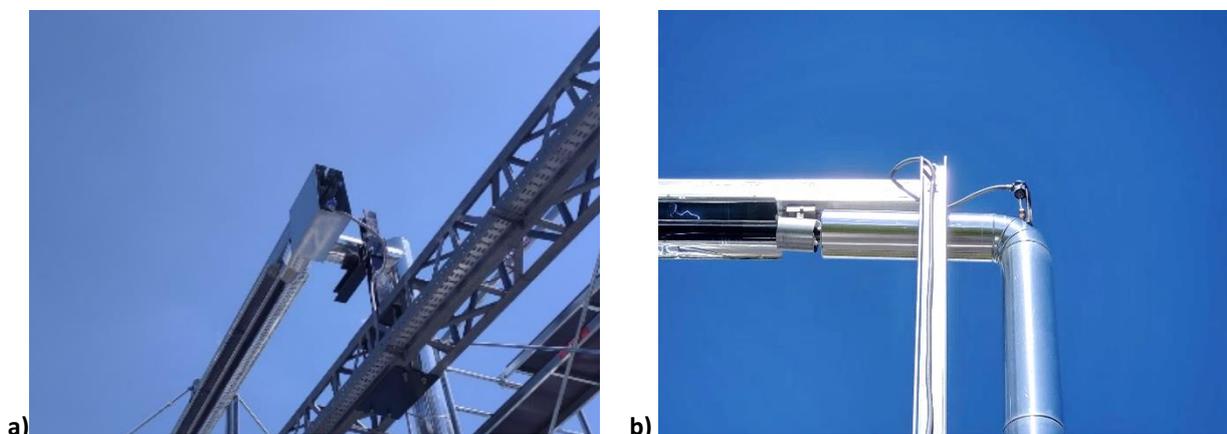


Figura 37. a) Schermo di protezione sulla termocoppia in uscita dal collettore solare; b) termocoppia in ingresso al collettore solare senza schermo di protezione



Figura 38. Sistema a carrucola per il sostegno della tubazione in ingresso al collettore solare.

Nel caso della termocoppia, essa è stata installata lungo la linea di focalizzazione della radiazione concentrata. Quindi, per evitare che durante le prime ore del mattino la termocoppia venga colpita in maniera diretta dalla radiazione, è stato interposto a protezione uno schermo. Tale soluzione è da implementare anche per la termocoppia in ingresso al campo solare (TE_1C_003, Figura 37b) perché, sebbene non si trovi lungo l'asse di focalizzazione, è stato rilevato che in alcuni momenti della giornata anch'essa viene colpita da radiazione concentrata.

Il supporto a carrucola, invece, è stato realizzato per evitare eccessivi carichi meccanici sul primo tubo ricevitore del collettore solare e, allo stesso tempo, consentire spostamenti verticali dovuti alle dilatazioni termiche.

6.1 Revamping del sistema per nuovi fluidi termovettori

Come precedentemente menzionato, nell'attuale configurazione dell'impianto ENEA-SHIP si fa uso di un fluido termovettore largamente impiegato nell'industria (Therminol 66), consentendo di unificare i circuiti idraulici del campo solare e del processo industriale a vantaggio dei costi e della operabilità del sistema. D'altra parte, l'utilizzo del Therminol 66 comporta una limitazione delle temperature massime raggiungibili dal campo solare (345 °C) e quindi una limitazione dello spettro di processi endotermici potenzialmente alimentabili dalla tecnologia CST.

Al fine 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 (dai 380 fino ai 550 °C), nell'ambito della presente linea di attività è stato effettuato uno studio preliminare di "revamping" del circuito sperimentale. Innanzitutto, considerando che le nuove miscele di sali considerate, sia ternarie che quaternarie, come anche le più conosciute miscele di sali binari, presentano una temperatura di congelamento variabile da 150 a 240 °C, in futuro si prevede di installare un sistema ausiliario di riscaldamento sulle tubazioni interessate dal passaggio del fluido termovettore, al fine di mantenere la temperatura sempre superiore al punto di inizio solidificazione, evitando la formazione di ostruzioni lungo il circuito.

Tipicamente, per mantenere le tubazioni a temperatura superiore a quella ambiente, anche in assenza di circolazione del fluido termovettore, negli impianti si utilizzano le tracciature elettriche. Tuttavia, nel caso specifico, le tracciature elettriche non possono essere installate sul tubo ricevitore, che è incapsulato

all'interno di un tubo di vetro evacuato. Pertanto, in futuro si prevede di utilizzare due sistemi di riscaldamento distinti per il circuito idraulico e per i tubi ricevitori.

In particolare, per le tubazioni ed i componenti soggetti al passaggio del fluido, si prevede di adottare un sistema di tracciature elettriche, ponendo particolare attenzione ai potenziali punti critici, ossia zone più difficili da scaldare o dove può verificarsi stagnazione di fluido, come ad esempio curve, raccordi e valvole. Per quest'ultime si dovrebbe applicare una tracciatura specifica in funzione della forma e del tipo. Contestualmente occorre prevedere anche l'installazione di ulteriori termocoppie per il controllo della temperatura di parete delle tubazioni e dei componenti critici.

Per quanto riguarda invece il tubo ricevitore, si prevede di implementare un sistema di riscaldamento per impedenza, in cui il passaggio di corrente nel tubo di acciaio produca un incremento di temperatura per effetto Joule. A tal fine occorre realizzare e installare due o tre morsetti elettrici (a seconda delle caratteristiche elettriche) lungo la linea dei ricevitori, ai quali collegare un generatore elettrico per l'erogazione della potenza minima necessaria a portare la temperatura dei tubi ricevitori al di sopra del punto di inizio solidificazione dei sali fusi. Chiaramente, l'installazione dei sistemi di riscaldamento sopra menzionati comporta una modifica sul quadro elettrico per incrementare il carico dovuto. Inoltre, a causa del passaggio di corrente nello spessore di acciaio dei tubi ricevitori, è necessario che il sistema di supporto dei tubi sia elettricamente isolato, al fine di evitare dispersioni di corrente verso la struttura di sostegno. A tale riguardo, secondo quanto dichiarato dal costruttore del collettore, il sistema presenta già supporti isolati elettricamente dalla struttura, per cui sarà necessario soltanto un controllo dell'idoneità di tale isolamento in relazione alle caratteristiche elettriche previste, rinviando eventuali aggiustamenti ad una fase successiva.

Per quanto riguarda i materiali, per effetto delle più alte temperature in gioco e della compatibilità chimica con i sali fusi, è necessario adottare acciaio inossidabile AISI 316 o simile per tutto il circuito. Allo stato attuale i tubi ricevitori montati sul campo solare sono già idonei al funzionamento dell'impianto con i sali fusi, essendo realizzati in acciaio AISI 321; diversamente, tutte le tubazioni del circuito, realizzate in acciaio al carbonio andranno sostituite con tubazioni in acciaio di tipo AISI 316. Analogo discorso va fatto per il riscaldatore elettrico e la pompa che sono progettati per lavorare con olio diatermico. Una possibile alternativa, per ridurre l'entità delle modifiche sull'impianto ENEA-SHIP, è il collegamento del campo solare con il BOP dell'esistente impianto PCS, che già opera con i sali fusi e che ha carichi termici pressoché equivalenti. In questo caso occorrerebbe realizzare solamente le tubazioni di connessione di andata e ritorno del collettore Fresnel con le rispettive tubazioni del collettore parabolico del PCS.

Da notare che, sebbene normalmente i tubi ricevitori in impianti a sali fusi siano posizionati con leggera pendenza per favorire le operazioni di drenaggio nei fermi-impianto, in questo caso sarà possibile mantenere l'attuale configurazione orizzontale, in quanto essa non pregiudica il completo drenaggio data la ridotta lunghezza del tratto di tubi ricevitori.

Infine, date le maggiori dilatazioni termiche del piping associate alle temperature di esercizio più elevate, sarà opportuno verificare l'efficacia dei supporti, adottando eventualmente alcuni accorgimenti quali l'ingrassaggio delle guide dei supporti "a scarpetta" o la sostituzione di quelli critici con sistemi a carrucola con tratti di tubazioni in sospensione.

7 Conclusioni

Nell'ambito della terza annualità del PTR 2019-2021 per la Ricerca di Sistema Elettrico, è stata progettata, realizzata e testata una piattaforma sperimentale a collettori lineari Fresnel dedicata allo studio, sperimentazione e validazione di nuove soluzioni tecniche e configurazioni di impianto per la fornitura di calore alle utenze industriali. La prima fase di testing sull'impianto è stata finalizzata alla verifica della funzionalità dei singoli sottosistemi (campo solare, riscaldatore elettrico, aerotermi e pompa) e alla risoluzione delle problematiche riscontrate nell'installazione dei componenti. 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. Durante tali prove è stata variata la portata del fluido termovettore (0.80, 1.05, 1.33, 1.60, 1.85 e 2.23 kg/s) e la potenza dell'aerotermo che simula l'utenza, mantenendo fissa la temperatura del fluido termovettore in ingresso all'aerotermo stesso. Ciò ha consentito di verificare la controllabilità del circuito. Attraverso tali prove, inoltre, è stata calcolata la potenza del campo solare dispersa verso l'ambiente.

Infine, l'impianto è stato testato "on-sun", variando le condizioni operative in modo da garantire una temperatura del fluido termovettore in ingresso al campo solare pari a 290 °C. Le prove sono state effettuate con portata del fluido impostata su due valori (1.30 e 2.15 kg/s) e a differenti regolazioni dell'inverter sull'aerotermo AE1. Dalle misure sul campo, per ciascun test svolto, è stata ricavata la prevalenza della pompa di ricircolo, l'incremento di temperatura ottenuto nel 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.

Nell'ambito del presente lavoro è stato inoltre implementato un modello previsionale a parametri concentrati del collettore Fresnel, sviluppato in ambiente Matlab®, in cui il tubo ricevitore, del tipo incapsulato ed evacuato, è suddiviso in due sezioni per tener conto della presenza del concentratore secondario che si affaccia sulla metà superiore del tubo.

Dal confronto tra le prestazioni misurate e quelle stimate attraverso tale modello previsionale emerge uno scostamento non trascurabile tra dati teorici e sperimentali: il rendimento globale misurato del campo solare è inferiore dell'80-90% rispetto a quello atteso. A titolo di esempio, la potenza fornita dal campo solare è pari a circa 25 kW, che equivale, in condizioni idonee, ad un salto termico di circa 7 °C, contro i 30 °C di picco. Ciò è sostanzialmente indice di una limitata qualità ottica del sistema, condizionata da diversi fattori, quali la riflettanza e la curvatura erronea degli specchi primari e del riflettore secondario, l'errore di allineamento e di inseguimento degli specchi. Dall'analisi sperimentale dei singoli sotto-componenti (specchi primari, concentratore secondario, tubo ricevitore), si evince che un non preciso allineamento degli specchi primari sia la principale causa della limitata qualità ottica del sistema. In particolare, la possibilità di movimentare autonomamente le diverse file di specchi, che introduce una notevole flessibilità operative nella gestione dell'impianto, ha comportato una maggiore complessità nella fase di calibrazione/allineamento degli specchi e nel corretto puntamento. Nel futuro sarà pertanto necessario disinstallare e reinstallare alcuni moduli riflettenti per migliorare la prestazione ottica dell'attuale collettore, mentre, in vista di possibili applicazioni commerciali della tecnologia SHIP, andrà valutato, caso per caso, il vantaggio derivante dalla movimentazione autonoma di ciascuna fila di specchi a fronte di una maggiore complessità nella fase di commissioning e nel normale esercizio di impianto.

Dal commissioning e dall'esercizio dell'impianto sono emersi ulteriori limiti progettuali meritevoli di analisi e revisione, al fine di supportare il trasferimento della tecnologia all'industria. Ad esempio, per il campo solare, si suggerisce la revisione degli attuali ancoraggi degli specchi, che bloccano la rotazione rispetto al piano orizzontale a soli $\pm 45^\circ$, rendendo praticamente impossibile l'accesso tra le file e l'esecuzione delle operazioni manuali di pulizia delle superfici riflettenti.

Inoltre, si suggerisce di inserire un ulteriore sfiato all'ingresso del campo solare per evitare la formazione di sacche d'aria nella fase di avviamento, soprattutto nel caso in cui il collettore non sia perfettamente in

piano. Difatti, nell'avviamento giornaliero del circuito, è stata spesso riscontrata la presenza di sacche d'aria, rilevabili per effetto di un'incoerente lettura della temperatura all'ingresso del campo solare.

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 olii diatermici, nell'ambito della presente linea di attività è stato effettuato uno studio di "revamping" del circuito sperimentale. I possibili interventi di modifica individuati riguardano principalmente l'installazione di un sistema di riscaldamento per la protezione delle tubazioni dal congelamento delle miscele di sali fusi, la cui temperatura di fusione varia da 150 a 240°C.

In particolare, in futuro si prevede di utilizzare due sistemi di riscaldamento distinti per il circuito idraulico e per i tubi ricevitori. Per le tubazioni ed i componenti soggetti al passaggio del fluido, si prevede di adottare un sistema di tracciature elettriche, ponendo particolare attenzione ai potenziali punti critici, ossia zone più difficili da scaldare o dove può verificarsi stagnazione di fluido, come ad esempio curve, raccordi e valvole.

Per quanto riguarda invece il tubo ricevitore, si prevede di implementare un sistema di riscaldamento per impedenza, in cui il passaggio di corrente nel tubo di acciaio produca un incremento di temperatura per effetto Joule.

Per quanto riguarda i materiali, per effetto delle più alte temperature in gioco e della compatibilità chimica con i sali fusi, è necessario adottare acciaio inossidabile AISI 316 o simile per tutto il circuito. Allo stato attuale i tubi ricevitori montati sul campo solare sono già idonei al funzionamento dell'impianto con i sali fusi, essendo realizzati in acciaio AISI 321; diversamente, tutte le tubazioni del circuito, realizzate in acciaio al carbonio andranno sostituite con tubazioni in acciaio di tipo AISI 316. Analogo discorso va fatto per il riscaldatore elettrico e la pompa che sono progettati per lavorare con olio diatermico. Una possibile alternativa, per ridurre l'entità delle modifiche sull'impianto ENEA-SHIP, è il collegamento del campo solare con il BOP dell'esistente impianto PCS, che già opera con i sali fusi e che ha carichi termici pressoché equivalenti. In questo caso occorrerebbe realizzare solamente le tubazioni di connessione di andata e ritorno del collettore Fresnel con le rispettive tubazioni del collettore parabolico del PCS.

Tale intervento consentirà di estendere il campo di applicazione della tecnologia SHIP 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.

8 Riferimenti bibliografici

1. Politecnico di Milano. Sectoral Focus Report – L'efficienza termica in Italia: soluzioni tecnologiche ed opportunità di business nell'industria. 2015.
2. International Energy Agency (IEA). World Energy Statistics 2016. Available: www.iea.org/statistics/.
3. Solar Payback - Solar Heat for Industry. 2017. [Online]. Available: <https://www.solar-payback.com/wp-content/uploads/2017/07/Solar-Heat-for-Industry-Solar-Payback-April-2017.pdf>
4. Y. A. Cengel. Termodinamica e trasmissione del calore. McGraw Hill, 1998.
5. G. Caputo *et al.* Progetto definitivo dell'impianto prototipo da realizzarsi presso il C.R. ENEA-Casaccia. 2021.