



Ricerca di Sistema elettrico

## Progetto definitivo dell'impianto prototipo da realizzarsi presso il C.R. ENEA-Casaccia

G. Caputo, P. D'Ascenzi, M. D'Auria, W. Gaggioli, M. Lanchi,  
A. Lombardi, P. Pagano, G. Petroni, C. Rocca, V. Russo

Progetto definitivo dell'impianto prototipo da realizzarsi presso il C.R. ENEA-Casaccia

G. Caputo, P. D'Ascenzi, M. D'Auria, W. Gaggioli, M. Lanchi, A. Lombardi, P. Pagano, G. Petroni, C. Rocca, V. Russo

Aprile 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II annualità

Obiettivo: Tecnologie

Progetto: 1.9

Work package: WP1 – Solare Termodinamico

Linea di attività: LA1.36 - Calore di processo per applicazioni industriali: progettazione di un impianto solare a concentrazione sperimentale dedicato presso C.R. ENEA-Casaccia

Responsabile del Progetto: ing. Alberto Giaconia, ENEA

Responsabile del Work package: ing. Alberto Giaconia, ENEA

## Indice

SOMMARIO .....	4
1 INTRODUZIONE .....	5
2 DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO SPERIMENTALE .....	6
2.1 FUNZIONAMENTO DELL'IMPIANTO .....	7
2.2 ANALISI TERMICA DEL CAMPO SOLARE .....	7
2.3 CONDIZIONI OPERATIVE DI IMPIANTO .....	17
3 DESCRIZIONE DEI PRINCIPALI COMPONENTI DI IMPIANTO .....	19
3.1 CALDAIA ELETTRICA .....	19
3.2 AEOROTERMI .....	20
3.3 TUBAZIONI E VALVOLE .....	24
3.4 COIBENTAZIONE .....	25
3.5 POMPA DI RICIRCOLO .....	27
3.6 VASO DI ESPANSIONE .....	34
3.7 CARPENTERIA .....	34
3.8 CAMPO SOLARE .....	36
3.9 SINTESI SPECIFICHE DEI COMPONENTI .....	37
4 SISTEMA DI CONTROLLO E ACQUISIZIONE DATI .....	38
4.1 SISTEMA DCS .....	40
4.2 PARTI STRUMENTALI .....	40
4.2.1 <i>Misure di temperatura</i> .....	41
4.2.2 <i>Misure di pressione</i> .....	42
4.2.3 <i>Misure di portata</i> .....	42
4.2.4 <i>Indicatori locali</i> .....	42
4.2.5 <i>Sicurezze</i> .....	42
5 IMPIANTO ELETTRICO .....	42
5.1 PERCORSI DEI CAVI DI POTENZA/COMANDO .....	43
5.2 IMPIANTO TERRA .....	44
6 CONCLUSIONI .....	46
7 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	47

## Sommario

Nel presente Report viene descritto il progetto definitivo dell'Impianto ENEA-SHIP, la cui realizzazione è prevista nell'ambito delle Linee di Attività LA1.36 e LA1.37 del Progetto 1.9 del PTR 2019-2021 per la Ricerca di Sistema Elettrico. L'impianto ENEA-SHIP è un'infrastruttura sperimentale rappresentativa della tecnologia solare a concentrazione per la fornitura di calore di processo, ed è finalizzata allo sviluppo e allo studio di soluzioni tecniche e configurazioni di impianto per l'alimentazione termica di utenze industriali. Il circuito sperimentale sarà sostanzialmente costituito da una linea di collettori lineari Fresnel, integrata con una caldaia elettrica per la modulazione delle temperature operative in ingresso al campo solare, e con un sistema di aerotermi per la simulazione dell'utenza in termini di temperature operative e di carichi termici.

L'infrastruttura consentirà di testare materiali, componenti e strategie operative per la fornitura di calore di processo e sarà configurato come un circuito flessibile e versatile, aperto a successive integrazioni e modifiche.

L'impianto verrà realizzato nell'area adiacente alla pre-esistente piattaforma sperimentale PCS, dedicata alla caratterizzazione e qualificazione di materiali e componenti per la tecnologia dei collettori parabolici lineari a sali fusi. Ciò consentirà non solo di beneficiare delle infrastrutture di trasmissione e distribuzione dell'elettricità e del sistema di acquisizione dati e controllo già presente sull'impianto PCS, ma di realizzare una piattaforma sperimentale polifunzionale per il solare a concentrazione, che offra diverse opzioni tecnologiche e soluzioni ingegneristiche utilizzabili nell'ambito di molteplici scenari applicativi.

Nel presente documento viene inizialmente riportata l'analisi termica preliminare del campo solare, con il calcolo dei bilanci di energia e materia, e vengono identificati i principali parametri operativi di processo. Successivamente vengono descritti i componenti di impianto, con la definizione delle caratteristiche operative e costruttive, e vengono brevemente presentate le specifiche del circuito idraulico, del sistema di acquisizione dati e controllo e del sistema elettrico. Tali dati sono stati utilizzati come base documentale per l'espletamento del bando di gara ai fini dell'assegnazione di un contratto di fornitura e messa in opera dell'impianto.

## 1 Introduzione

È stato stimato che un quarto del consumo totale di energia a livello europeo è attribuibile al settore industriale, e di tale quota il 60% è riferibile a consumi elettrici ed il 40% a consumi termici [1]. Da analisi condotte dal Joint Research Center della Commissione Europea [2], la domanda europea di calore industriale è per la maggior parte associata a processi industriali ad alta temperatura. L'energia solare può soddisfare una parte considerevole del fabbisogno di calore dell'industria, sia attraverso il ricorso alla tecnologia solare termica per applicazioni a bassa temperatura (<100 °C, ad es. processi di lavaggio), sia attraverso l'impiego della tecnologia solare a concentrazione per le applicazioni a medio/alta temperatura (>200 °C, ad es. processi che richiedono l'uso di vapore quali pastorizzazione ed essiccazione).

Attualmente l'utilizzo dell'energia solare per l'alimentazione termica dei processi industriali è limitato alle basse temperature (tecnologie a collettori piani): poche centinaia di grandi impianti solari termici asserviti alle industrie sono installati nel mondo e vengono utilizzati principalmente per il preriscaldamento dell'acqua di alimentazione nelle caldaie a vapore [3].

Per le applicazioni a medio/alta temperatura, che rappresentano una consistente quota del consumo termico dell'industria (circa il 70%) e che pertanto costituiscono un mercato molto vasto e di grande interesse per il solare a concentrazione termico (CST), non esistono soluzioni tecnologiche consolidate. Pur potendo garantire produzione affidabile e flessibile di calore, il solare a concentrazione deve infatti 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 tecnologie solari a concentrazione modulari, espandibili e integrabili, e nell'identificazione di specifiche strategie di gestione ed esercizio, al fine di assicurare stabilità di funzionamento del processo e ridotti costi operativi e di manutenzione. Nell'ambito della precedente annualità, al fine di presentare potenziali scenari applicativi della tecnologia solare a concentrazione per la fornitura di calore a medio/alta temperatura (tecnologia SHIP), sono stati sviluppati originali schemi di integrazione tra le operazioni unitarie endotermiche di alcuni specifici settori industriali e le possibili configurazioni degli impianti solari asserviti, identificando potenziali combinazioni tra i diversi sottosistemi ed elementi di impianti CST (collettori solari, fluidi termovettori, unità di accumulo di energia termica, interfaccia con l'utenza industriale). Tale analisi teorica rappresenta un primo passo nello sviluppo di una tecnologia CST tecnicamente ed economicamente sostenibile, che possa soddisfare i fabbisogni termici di processi industriali consolidati, favorendo la penetrazione delle rinnovabili e la decarbonizzazione di un settore difficilmente "elettrificabile". Al fine di promuovere lo sviluppo della tecnologia CST applicata alla fornitura di calore industriale, il passo successivo è la realizzazione e il testing di elementi e componenti di impianto su scala reale, per verificarne eventuali limiti progettuali, valutarne durabilità ed efficienza ed elaborare strategie operative. A tale scopo, nell'ambito della presente annualità del PTR 2019-2021, è stata progettata un'infrastruttura sperimentale, da realizzarsi presso il C.R. ENEA Casaccia, dedicata allo studio di soluzioni tecniche e configurazioni di impianto per la fornitura di calore di processo ad utenze industriali. Il circuito sperimentale sarà sostanzialmente costituito da una linea di collettori lineari Fresnel, integrata con una caldaia elettrica per la modulazione delle temperature operative in ingresso al campo solare, e con un sistema di aerotermi per la simulazione dell'utenza in termini di temperature operative e di carichi termici.

Tale configurazione di impianto consentirà 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.

La piattaforma, il cui schema concettuale è riportato in Figura 1, sarà rappresentativa del funzionamento di sistemi a media temperatura, operanti con olio diatermico (Therminol 66), e sarà predisposta per potenziali e futuri interventi di ampliamento (integrazione di nuovi collettori/stoccaggi termici/interfacce di processo) e/o progetti integrati su scala pilota.

Il presente documento riporta il Progetto Definitivo elaborato da ENEA per l'espletamento delle procedure di gara ai fini dell'assegnazione di un contratto di fornitura e messa in opera dell'impianto.

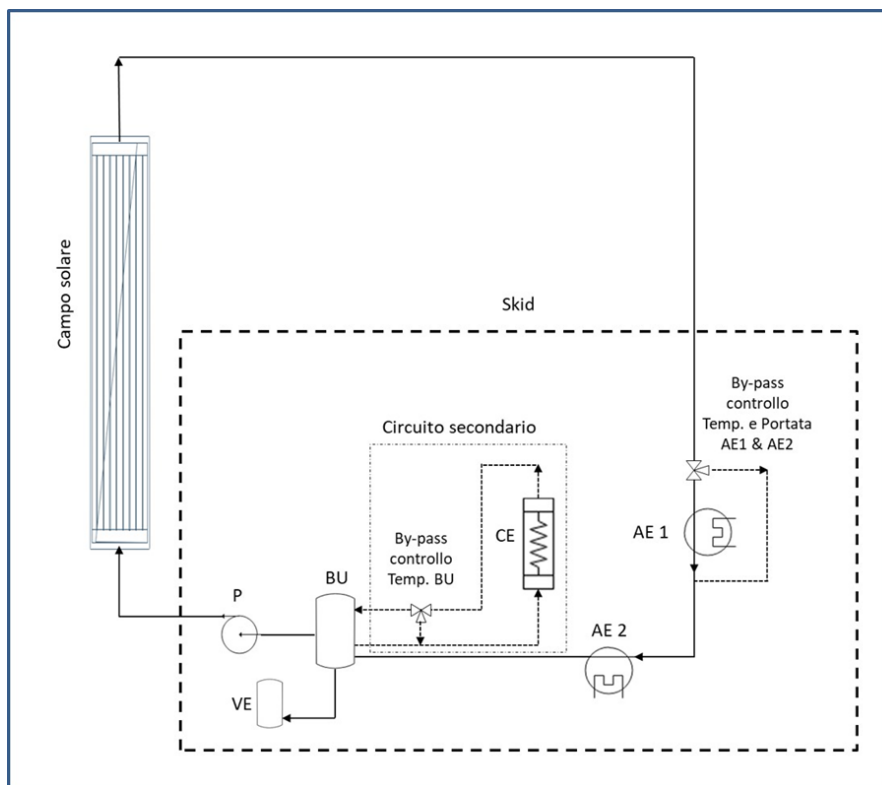


Figura 1. Impianto ENEA-SHIP - schema concettuale.

## 2 Descrizione dell'impianto sperimentale

I principali componenti dell'impianto ENEA-SHIP in via di realizzazione presso il C.R. ENEA Casaccia sono di seguito elencati:

- Linea Collettori Fresnel (CSP): stringa di collettori Fresnel con superficie riflettente pari a circa 350 m<sup>2</sup>, lunghezza massima pari a 40 m, larghezza massima pari a 20 m;
- Caldaia elettrica (CE): riscaldatore elettrico posizionato a monte del campo solare, funzionale al preriscaldamento dell'olio diatermico nella fase di start-up dell'impianto. In tale fase operativa il fluido termovettore viene circolato nel circuito secondario dell'impianto costituito dalla caldaia elettrica e dal Buffer (BU) fino al raggiungimento della temperatura target di ingresso al campo solare. La potenza elettrica è di 100 kW. In fase operativa nominale, con il campo solare funzionante, il contributo energetico della caldaia elettrica è richiesto solo per piccoli aggiustamenti della temperatura di ingresso dell'olio al campo solare;
- Aeroterma 1 (AE1): scambiatore di processo olio-aria, che simula specifiche utenze, soprattutto in termini di temperature operative. La potenza assorbita dall'aeroterma potrà rappresentare in scala il carico termico dell'utenza in esame. La potenza massima dell'Aeroterma 1 è pari a 100 kW;
- Aeroterma 2 (AE2): scambiatore di servizio olio-aria, funzionale al controllo della temperatura dell'olio in ingresso al campo solare. La potenza massima dell'Aeroterma 2 è equivalente all'Aeroterma 1;
- 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;
- Vaso d'espansione (VE): vaso d'espansione pressurizzato con linea di azoto (circa 6 atm);
- Pompa (P): pompa centrifuga di rilancio per la circolazione dell'olio diatermico nell'impianto sperimentale. operativa nell'intervallo 0.75-2.3 kg/s.

Il circuito è destinato alla caratterizzazione sperimentale dei componenti critici di impianto che consentono di interfacciare i sistemi CST con processi industriali a media temperatura e i test verranno effettuati in condizioni di portata e di temperatura quanto più prossime a quelle esistenti sugli impianti reali.

## 2.1 Funzionamento dell'impianto

Facendo riferimento alla Figura 1, nella fase di 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, dipendentemente dalle specifiche operative dell'utenza.

La modulazione delle condizioni di funzionamento dell'AE1 (temperatura di uscita e potenza rilasciata) viene conseguita attraverso il controllo della portata della linea di by-pass, disposta in parallelo all'AE1. Nell'AE2 la temperatura del fluido termovettore viene riportata al valore di set (290°C), mentre la CE compensa le minime perdite termiche nel circuito.

Nella fase di start-up dell'impianto, il fluido termovettore viene ricircolato all'interno del circuito secondario, costituito da Caldaia elettrica e Buffer, fino al raggiungimento della temperatura operativa minima dell'olio (290 °C).

Nella fase di shut-down il collettore solare viene messo fuori fuoco e il fluido termovettore viene mantenuto in circolazione nel circuito primario fino al raggiungimento della temperatura minima target dell'olio.

## 2.2 Analisi termica del campo solare

Come precedentemente menzionato, per il presente Progetto si assume che il campo solare sia composto da una stringa di collettori lineari Fresnel le cui caratteristiche geometriche sono riportate in Tabella 1.

**Tabella 1. Specifiche e caratteristiche geometriche del campo solare.**

	u.m.	
Lunghezza loop	m	38
Superficie specchi max di riferimento	m <sup>2</sup>	322
Efficienza ottica minima attesa		64%
Numero tubi ricevitori		9
Ricevitore		ASE HCEO12
Fluido termovettore		Therminol 66

Al fine di identificare le condizioni di esercizio dell'impianto, in termini di portata di fluido termovettore e potenza raccolta dal campo solare, di seguito si riporta l'analisi della radiazione solare incidente sul piano dei collettori per il sito della Casaccia.

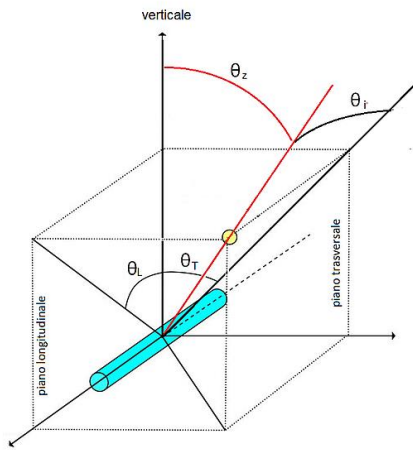
Partendo dalla curva oraria della DNI relativa all'anno tipo, che presenta un integrale annuo di 1738 kWh/(m<sup>2</sup>y), è stata valutata l'energia effettivamente assorbita in funzione delle caratteristiche del sistema di concentrazione.

Come precedentemente menzionato, nell'impianto si prevede di installare collettori lineari Fresnel; pertanto, per poter valutare la radiazione effettivamente incidente sulla superficie degli specchi, occorre determinare la posizione del sole, sia trasversalmente che longitudinalmente rispetto all'asse dei collettori (Figura 2). Successivamente occorre definire un fattore modificatore dell'angolo di incidenza (IAM) dato dal prodotto dei due 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, si ha 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.

Per quanto riguarda il termine longitudinale ( $IAM_L$ ), questo dipende dall'angolo di incidenza definito come l'angolo formato dalla proiezione del Sole nel piano verticale disposto longitudinalmente rispetto al tubo ricevitore e l'asse verticale del concentratore.



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

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

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

**Figura 2. Definizione degli angoli di incidenza per un collettore Fresnel.**

- $\theta_l$ : angolo di incidenza longitudinale;
- $\theta_t$ : angolo di incidenza trasversale;
- $\theta_i$ : angolo d'incidenza;
- $\theta_z$ : angolo zenitale;
- $\gamma$ : angolo di azimuth del sole;
- $\gamma_c$ : angolo di inclinazione dei collettori solari.

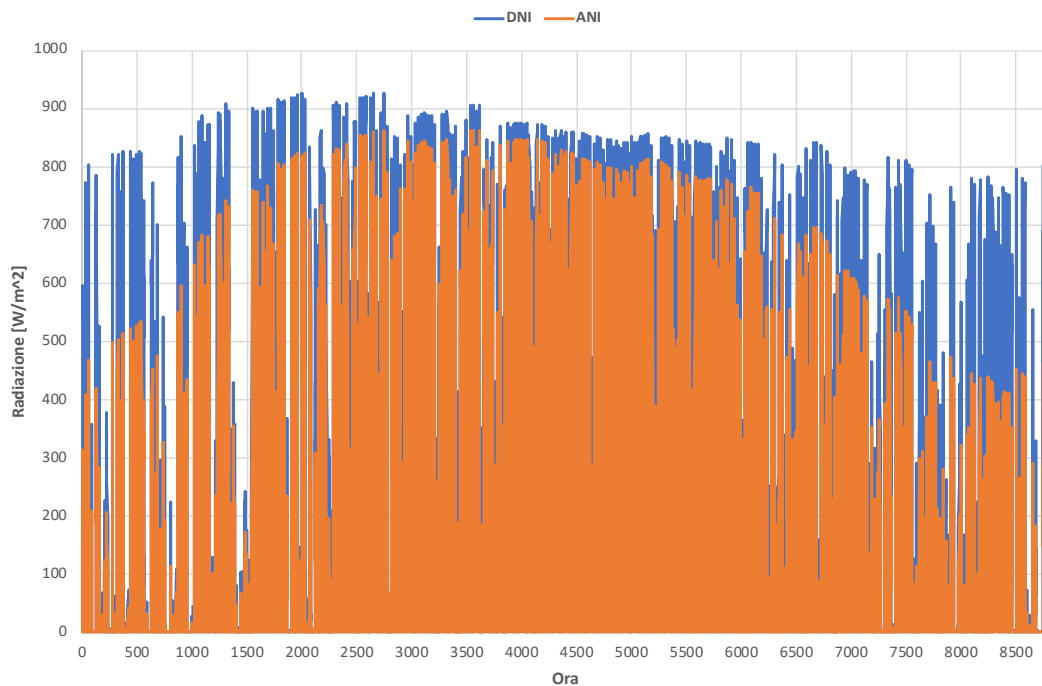
La radiazione sull'apertura del collettore, ANI (Aperture Normal Irradiance), è calcolata attraverso la seguente relazione:

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

Gli angoli di incidenza, longitudinale e trasversale, dipendono dalle caratteristiche del concentratore. Non avendo a disposizione, in questa fase di progettazione preliminare, dati tecnici specifici, per il calcolo della ANI sono stati utilizzati i coefficienti degli IAM trasversali e longitudinali di collettori Fresnel (Suncnim) che presentano caratteristiche geometriche simili al collettore ipotizzato nel presente studio.

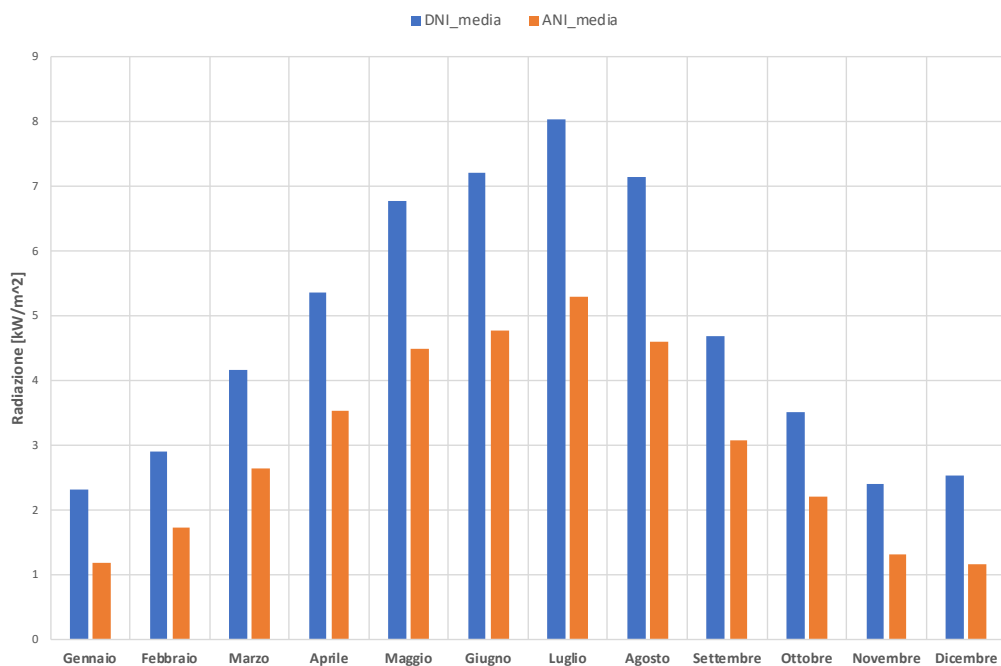
In Figura 3 viene rappresentano l'andamento orario annuo della DNI e dell'ANI, calcolata come precedentemente descritto, che presenta un integrale annuo di 1096 kWh/(m<sup>2</sup>y) relativo al sito della Casaccia.





**Figura 3. Andamento orario di DNI ed ANI per il sito della Casaccia.**

La Figura 4 mostra l'energia media giornaliera mensile per DNI e ANI, mentre la Figura 5 riporta la distribuzione annua della radiazione solare; da tale Figura si evidenzia come la radiazione incidente sugli specchi sia superiore a  $800 \text{ W/m}^2$  solamente per 122 ore l'anno.



**Figura 4. Energia media giornaliera mensile per il sito della Casaccia.**

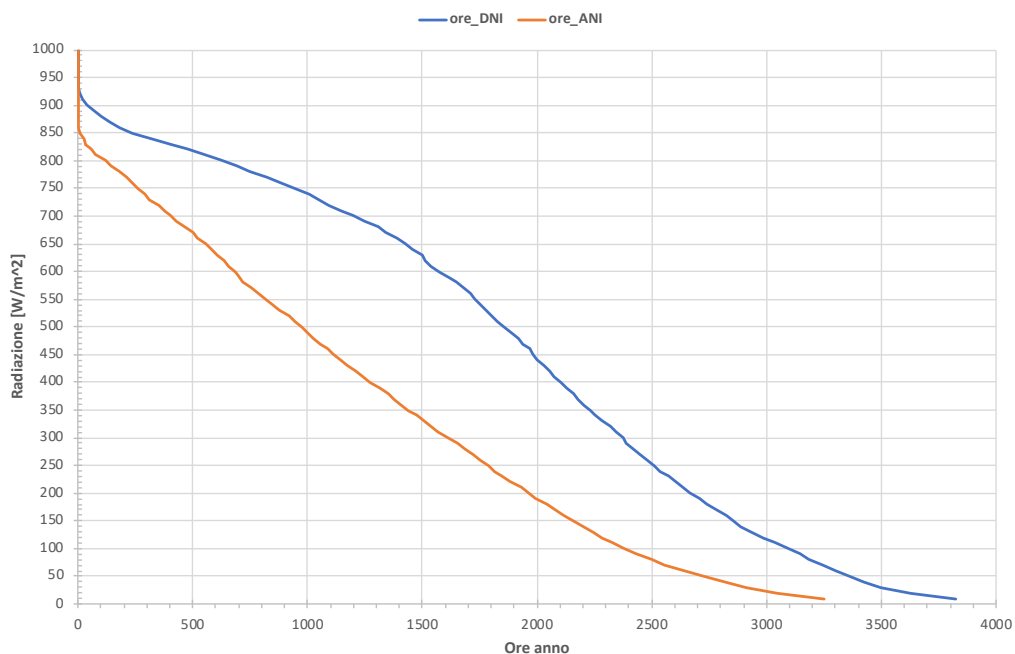


Figura 5. Distribuzione annua della radiazione solare per il sito della Casaccia.

Inizialmente è stata effettuata una valutazione di massima del funzionamento annuo del campo solare, impostando la condizione di temperatura costante dell’olio in uscita dal collettore pari a 320 °C, con un salto termico di 30 °C.

Lo scopo dello studio è stata la definizione della potenza raccolta dal campo solare durante l’anno, identificando il numero di ore nelle quali la potenza risulta superiore ad un valore fissato e la sua distribuzione.

Per valutare l’energia, e di conseguenza 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 6 è mostrato uno schema semplificato dei flussi energetici caratteristici per un collettore Fresnel.

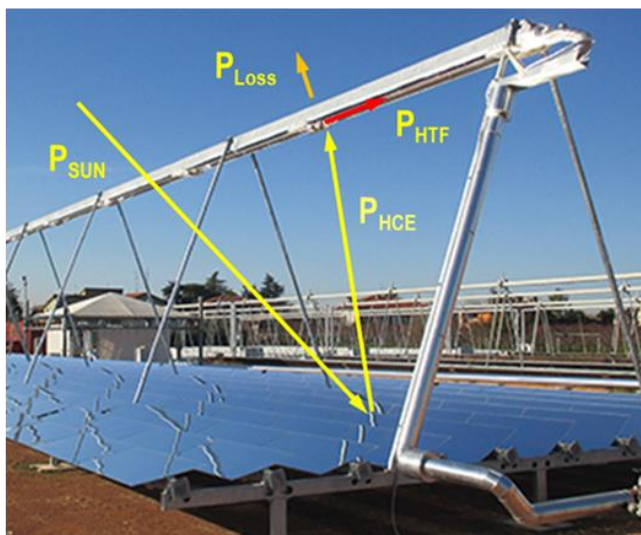


Figura 6: Schema semplificato dei flussi di energia nel collettore

Noto il valore dell'ANI, e l'area del collettore solare A, è stato possibile calcolare la potenza termica solare  $P_{SUN}$ :

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

La potenza termica che può essere concentrata sul tubo ricevitore, HCE (Heat Collecting Element),  $P_{HCE}$ , dipende dall'efficienza ottica del collettore:

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

mentre 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:

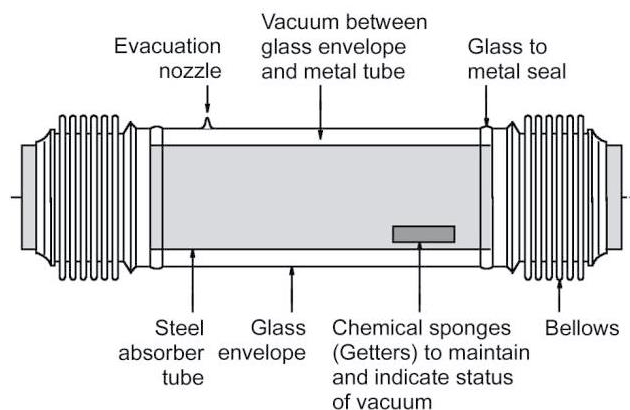
$$P_{HTF} = P_{HCE} \cdot \eta_{th} \quad (4)$$

L'efficienza totale del collettore, intesa come il rapporto tra la potenza termica trasferita al fluido e quella che incide sull'apertura del collettore, è data dal prodotto dei rendimenti ottico e termico:

$$\eta = \frac{P_{HTF}}{P_{SUN}} = \eta_{opt} \cdot \eta_{th} \quad (5)$$

Il rendimento ottico risulta il prodotto di diverse variabili, alcune associabili al collettore stesso ed altre al tubo ricevitore e dipende dalle caratteristiche del sistema di concentrazione. Tipicamente per i collettori Fresnel il rendimento ottico è compreso tra 0.63 e 0.69; nello specifico è stato assunto un rendimento ottico nominale pari a 0.64.

Il rendimento termico dipende essenzialmente dalle prestazioni del tubo ricevitore, in particolare dalle perdite termiche in funzione della temperatura di esercizio. In Figura 7 è mostrato schematicamente un tubo ricevitore per collettori lineari.



**Figura 7. Schema di un tubo ricevitore per impianti CSP.**

Per quanto riguarda le perdite termiche del tubo, nei sistemi evacuati la convezione interna tra tubo di acciaio e tubo di vetro è trascurabile e le dispersioni termiche avvengono essenzialmente per irraggiamento tra tubo di acciaio e tubo di vetro. Per analizzare il comportamento termico dei collettori solari è stato sviluppato un modello dettagliato del tubo ricevitore basato sull'analogia con le reti elettriche (Figura 8).

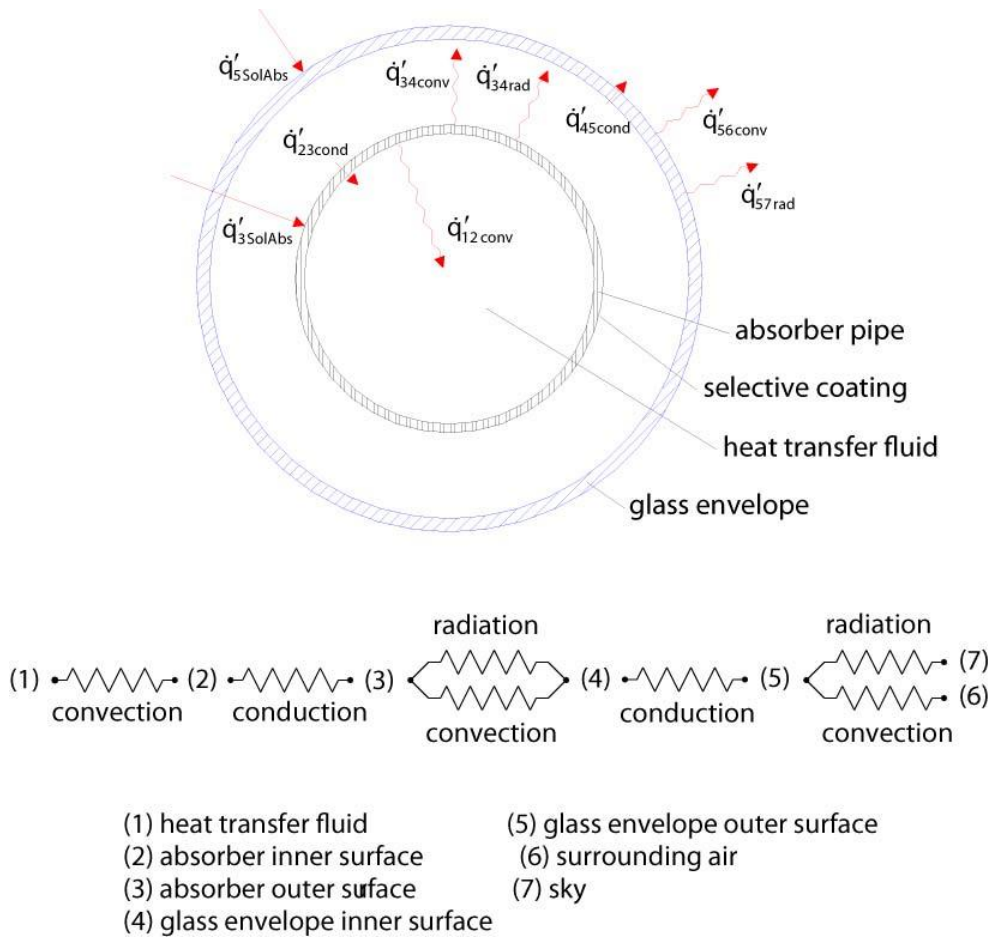
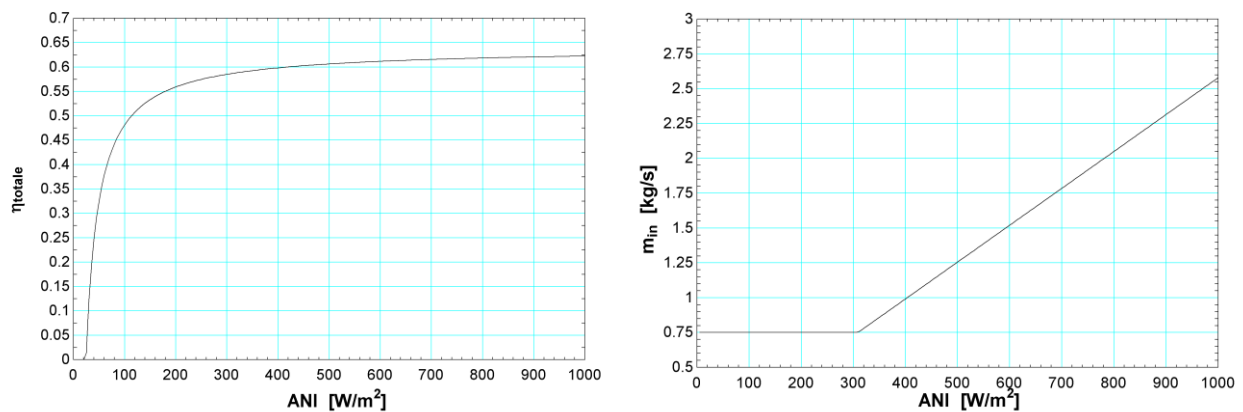


Figura 8. Schema dei flussi energetici di un tubo ricevitore.

Il modello consente di descrivere il comportamento del tubo ricevitore nelle varie condizioni operative e anche in caso di perdita del vuoto nell'intercapedine tra tubo interno di acciaio e tubo esterno di vetro. Utilizzando il modello del singolo tubo ricevitore è possibile realizzare il modello dell'intera stringa di collettori connettendo in serie tutti i tubi presenti. In tal modo è possibile analizzare il comportamento dell'intera stringa in funzione dei diversi parametri di interesse: radiazione solare, temperatura ambiente, velocità del vento, temperatura del fluido (ingresso e uscita), tipo di fluido, tipo di tubo ricevitore e suo stato (pressione dell'intercapedine).

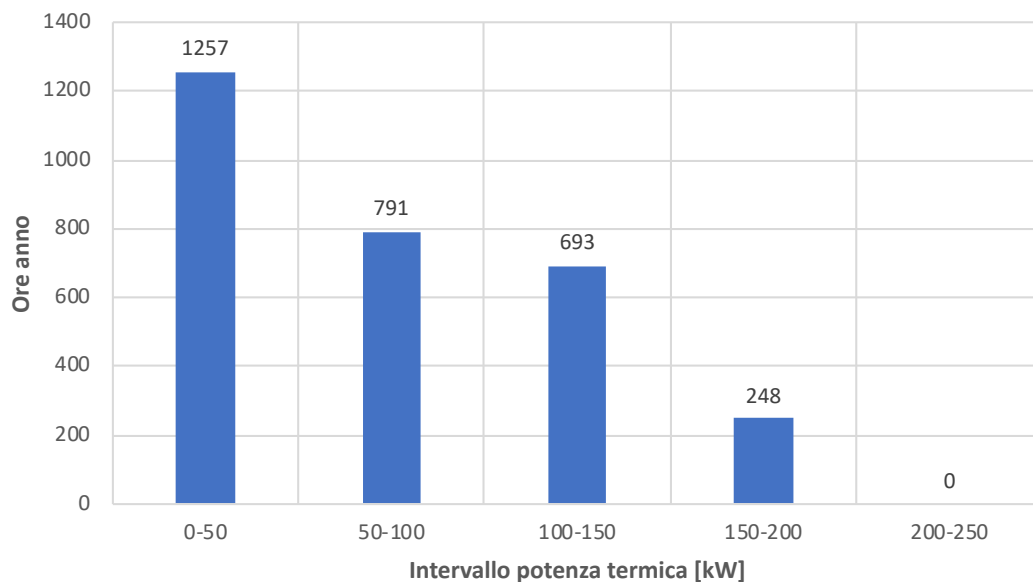
Attraverso l'applicazione del modello sono state elaborate le mappe di funzionamento del campo solare, ossia l'andamento della portata del fluido e dell'efficienza totale in funzione dell'intensità della radiazione solare e della temperatura di ingresso.

In Figura 9 viene mostrata rispettivamente la portata ed il rendimento globale per il campo solare in esame; la portata minima è stata fissata pari a 0.75 kg/s. Dalla Figura si evidenzia come, in corrispondenza di radiazione pari a 300 W/m<sup>2</sup>, per ottenere le condizioni nominali in uscita dal collettore, è necessario impostare la portata al valore minimo; al di sotto di tale valore la portata viene mantenuta costante.



**Figura 9. Andamento del rendimento e della portata del campo solare in funzione della ANI.**

Successivamente, conoscendo la curva oraria di radiazione effettivamente incidente sul piano dei collettori (ANI), è stata valutata, per un intero anno, la potenza raccolta dal campo solare e sono stati analizzati i dati sia su base mensile che annuale. In Figura 10 viene rappresentato, su base annuale, il numero di ore in cui la potenza raccolta dal collettore solare risulta compresa in uno specifico intervallo.



**Figura 10. Distribuzione annuale delle ore di potenza raccolta dal campo solare per il sito della Casaccia.**

In Figura 11 viene rappresentato, su base mensile, il numero di ore in cui la potenza raccolta dal collettore solare risulta compresa in un determinato intervallo, mentre in Figura 12 viene rappresentata la distribuzione annua della frequenza della radiazione solare e della potenza raccolta dal collettore.

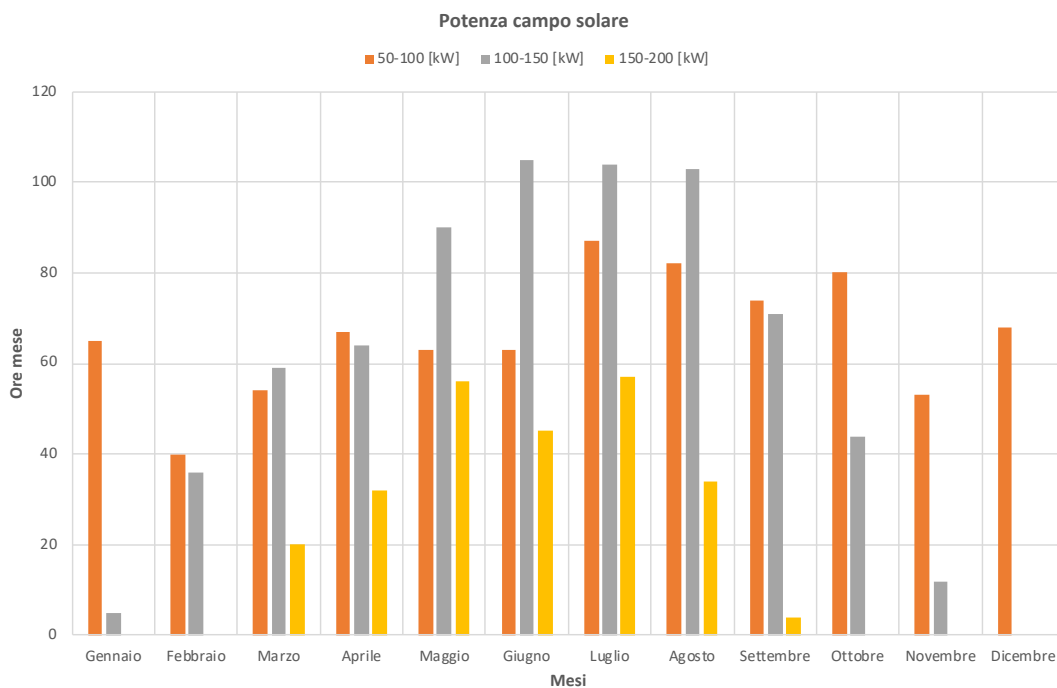


Figura 11. Distribuzione mensile delle ore di potenza raccolta per il sito della Casaccia.

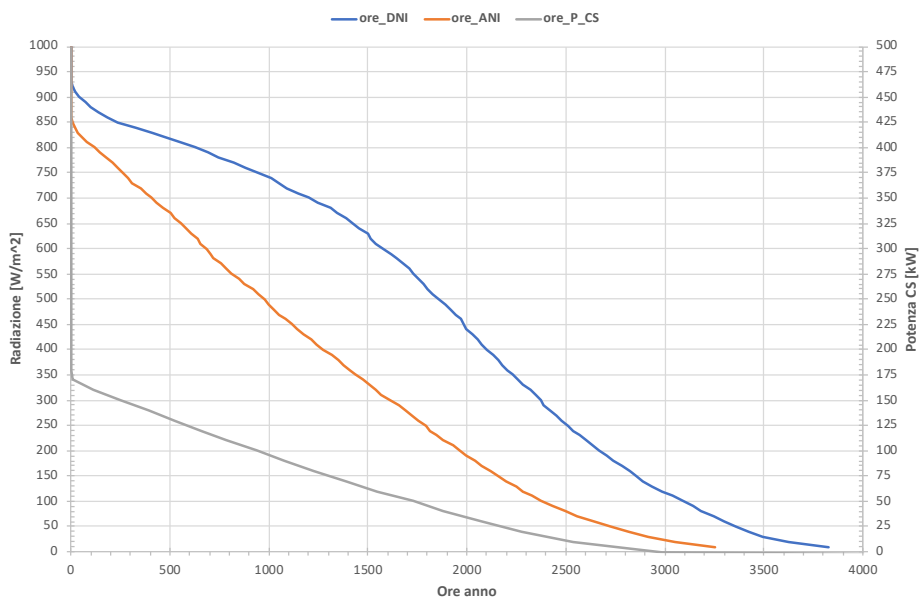
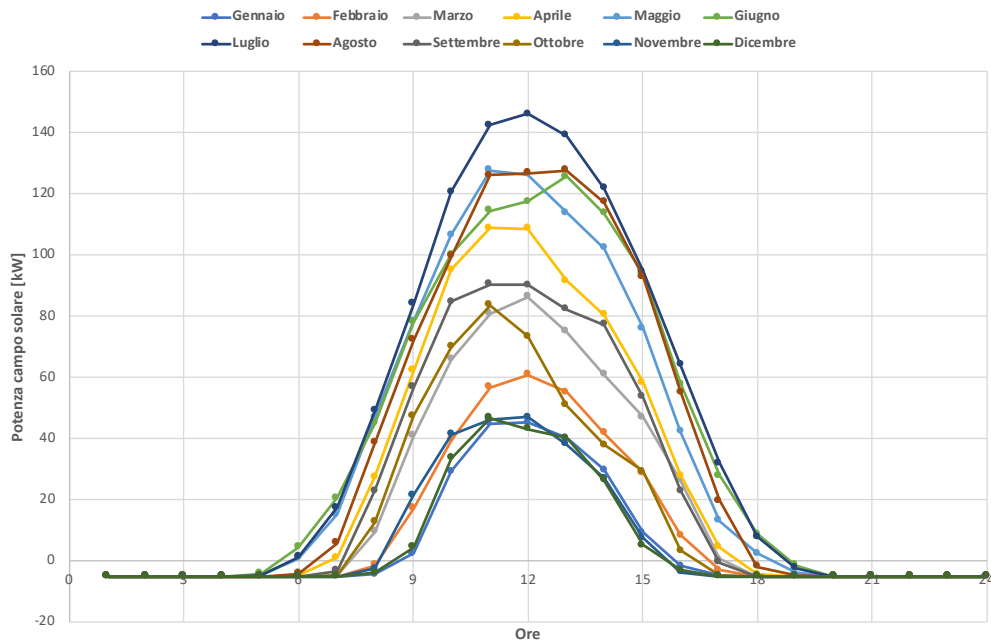


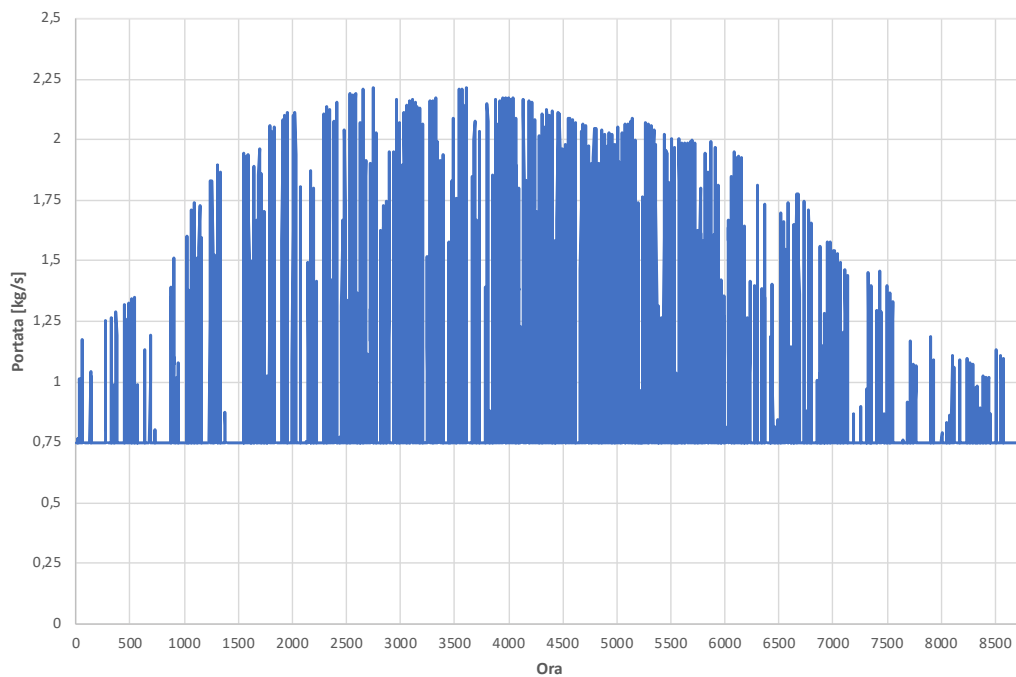
Figura 12. Distribuzione annua della radiazione solare e potenza raccolta dal collettore nel sito della Casaccia.

Successivamente è stato valutato l'andamento medio giornaliero mensile della potenza raccolta, Figura 13.



**Figura 13. Media giornaliera mensile della potenza raccolta dal collettore solare presso il sito della Casaccia.**

Inoltre è stato studiato l'andamento della portata di fluido termovettore durante il funzionamento dell'impianto: come rappresentato in Figura 14, la portata varia tra un valore minimo di 0.75 kg/s ad uno massimo pari a circa 2.3 kg/s, al fine di mantenere costante il salto termico di 30 °C tra ingresso e uscita.



**Figura 14. Portata del fluido termovettore su base annua.**

Infine è stata valutata la potenza raccolta e la portata di olio nel collettore solare per due giornate tipo, come mostrato in Figura 15 e Figura 16.



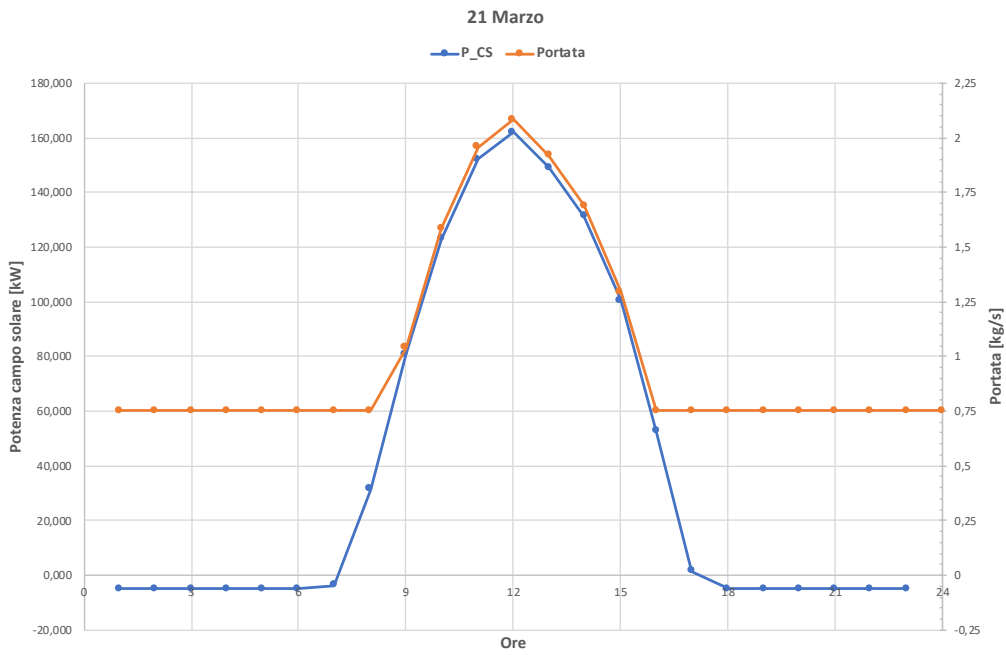


Figura 15. Andamento orario della potenza raccolta dal collettore e della portata di olio per il 21 Marzo.

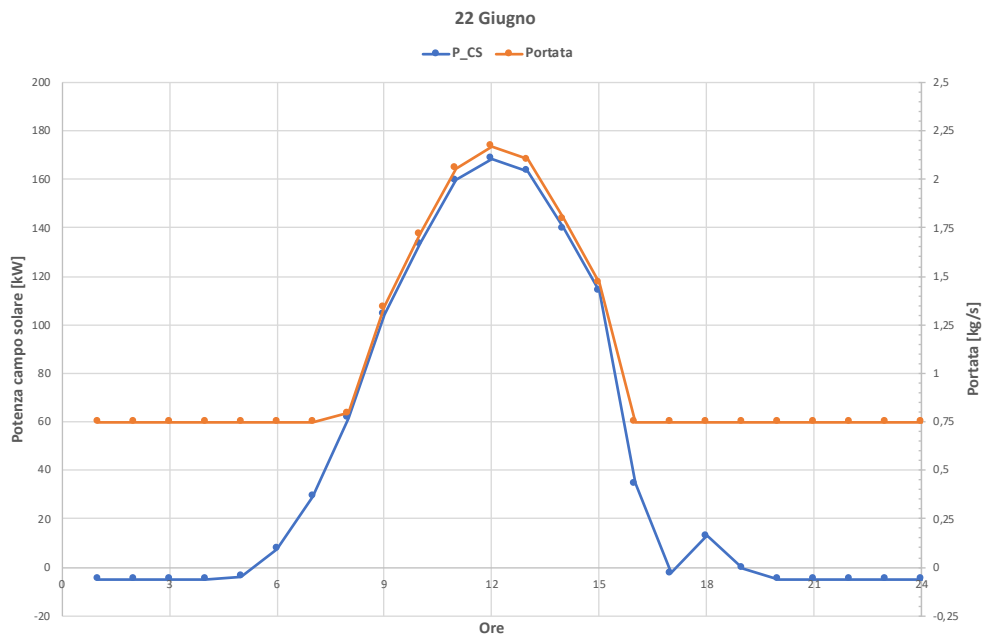


Figura 16. Andamento orario della potenza raccolta dal collettore e della portata di olio per il 22 Giugno.

In Tabella 2 vengono elencati i principali parametri geometrici del campo solare insieme ai risultati dell'analisi termica sopra descritta.

**Tabella 2. Parametri caratteristici del campo solare e risultati dell'analisi termica.**

	<i>u.m.</i>	
DNI annua	kWh/m <sup>2</sup>	1738
ANI annua	kWh/m <sup>2</sup>	1096
Radiazione solare (ANI) di riferimento	W/m <sup>2</sup>	800
Radiazione solare (ANI) di picco	W/m <sup>2</sup>	863
Radiazione solare (ANI) minima	W/m <sup>2</sup>	300
Orientamento collettore campo solare		E-O
Numero moduli		1
Lunghezza indicativa modulo	m	38
Larghezza indicativa modulo	m	12
Superficie indicativa riflettente totale	m <sup>2</sup>	322
Efficienza ottica ipotizzata	%	64
Numero tubi ricevitori	-	9
Ricevitore di riferimento	-	ASE HCEO12
Fluido termovettore	-	Therminol 66
Temperatura ingresso campo solare con ANI MAX	°C	290
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	kWt	159
Potenza termica con (ANI) di picco	kWt	178
Potenza termica con (ANI) minima	kWt	58.5

### 2.3 Condizioni operative di impianto

Per definire le prestazioni del circuito e determinare i limiti operativi dei vari componenti è stata eseguita una simulazione del circuito sperimentale nelle seguenti condizioni operative limite:

- ANI massima del sito;
- ANI nulla.

La potenza nominale della caldaia elettrica è stata determinata considerando un valore di ANI minima pari a 300 W/m<sup>2</sup>.

In Figura 17 è riportato il Process Flow Diagram (PFD) dell'impianto sperimentale con i bilanci di massa e di energia relativi al caso di ANI pari 863 W/m<sup>2</sup> (condizione di picco).

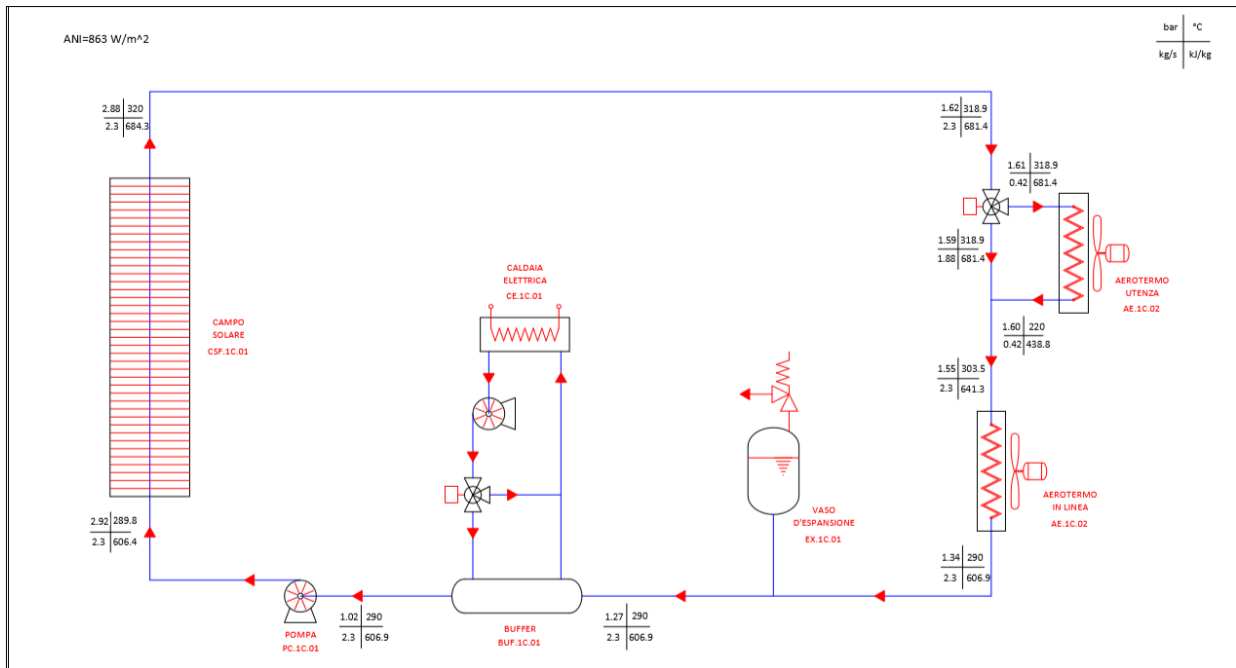


Figura 17. Process Flow Diagram relativo al caso di ANI pari a 863 W/m<sup>2</sup> (condizione di picco).

In Figura 18 è riportato il PFD dell'impianto con i bilanci di massa e di energia relativi al caso di ANI nulla.

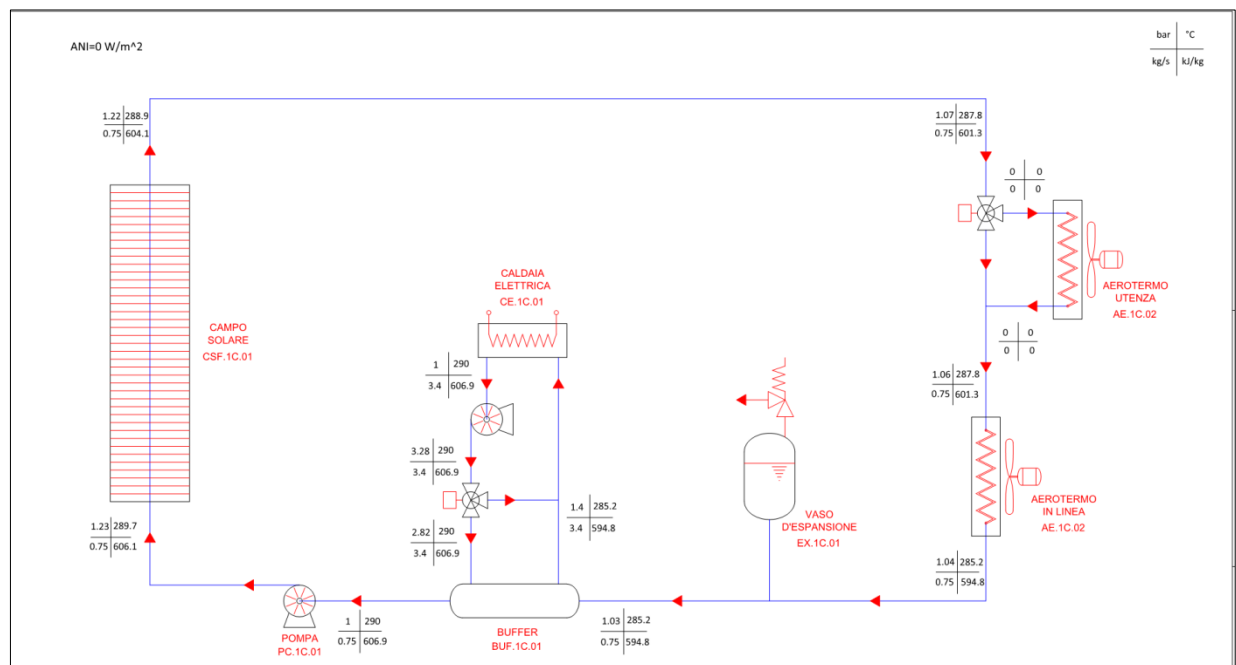


Figura 18. Process Flow Diagram relativo al caso di ANI nulla.

In caso di ANI nulla e fluido circolante, l'AE02 disperde circa 5 kW.

### 3 Descrizione dei principali componenti di impianto

Sulla base delle dimensioni del campo solare e delle condizioni operative identificate nel precedente paragrafo, viene di seguito fornito un dimensionamento di massima dei principali componenti di impianto, con la descrizione delle specifiche e delle caratteristiche di funzionamento.

Ovviamente, durante la fase di preparazione del progetto esecutivo, sarà eseguita una revisione del dimensionamento di massima dei principali componenti di impianto in modo da rendere coerente il progetto con le caratteristiche del collettore solare selezionato dal contraente, le caratteristiche dei componenti disponibili commercialmente, e la normativa tecnica e di sicurezza del settore di riferimento. Durante questa fase potranno essere proposte soluzioni tecnologiche migliorative che si adattano agli scopi del circuito.

#### 3.1 Caldaia Elettrica

La caldaia elettrica è costituita da un corpo riscaldante multi tubolare in acciaio al carbonio, con resistenze elettriche corazzate flangiate in serie e immerse nell'olio. L'isolamento termico verso l'esterno è realizzato in lana minerale. La potenza nominale della caldaia deve essere pari a 100 kW, 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 devono essere pari, rispettivamente, a 350 °C e 6 bar; mentre in esercizio la temperatura e la pressione devono essere, rispettivamente, minore o uguale a 320 °C e inferiore a 6 bar.

Il numero di resistenze elettriche installate deve essere pari o superiore a 2 (50+50 kW), ciascuna dotata di due stadi di potenza: uno di tipo ON/OFF e l'altro modulabile con continuità da 0 a 100%. Inoltre le resistenze devono essere dotate di sonde tipo PT100 per il rilievo e la regolazione della temperatura (compreso il blocco alta temperatura).

Nella fase di avviamento la caldaia riscalda il fluido termovettore, erogando l'intera potenza elettrica (100%), fino a raggiungere una temperatura inferiore di 10 °C rispetto a quella impostata. Raggiunta questa condizione, sulle resistenze viene spento lo stadio di potenza ON/OFF e agisce solo lo stadio modulante.

La caldaia si interfaccia al circuito principale attraverso il serbatoio BU di accumulo, dal quale la pompa del circuito primario preleva l'olio diatermico da inviare al collettore. La temperatura del serbatoio BU viene regolata e mantenuta a temperatura costante dalla caldaia elettrica mediante una valvola deviatrice a 3 vie, azionata da un sensore di temperatura PT100 inserita nel serbatoio stesso.

La caldaia è dotata di una pompa di circolazione olio indipendente da quella del circuito principale. La pompa, inclusa nel monoblocco, deve avere tenuta meccanica per temperature di progetto fino a 350°C. La pompa deve lavorare a portata costante (circa 16.8 m<sup>3</sup>/h), in modo da ottenere una differenza massima di temperatura di 10 °C tra ingresso e uscita caldaia e di preservare l'olio dal deterioramento per eventuali surriscaldamenti. La prevalenza della pompa deve essere almeno sufficiente a vincere le perdite di carico all'interno del circuito secondario tra caldaia e serbatoio BU. Per evitare possibili problemi all'avviamento a basse temperature, la caldaia deve essere dotata di sistema automatico di circolazione dell'olio che entra in funzione a temperatura inferiore a +20 °C.

La caldaia deve essere dotata di un quadro elettrico realizzato secondo le norme CEI, provvisto di pannello operatore per i) l'avviamento della pompa di circolazione, ii) la selezione della potenza termica necessaria, iii) l'impostazione e la visualizzazione della temperatura, iv) la verifica e la gestione degli allarmi. I comandi devono consentire il controllo da remoto della caldaia mediante un collegamento al DCS già presente sull'impianto PCS, in modo da impostare e modificare la temperatura di lavoro, registrare lo storico di funzionamento, gli eventi e gli allarmi.

Per l'installazione occorre eseguire l'allacciamento al quadro elettrico di comando e collegare gli attacchi di mandata e di ritorno al circuito idraulico. Il collegamento alla linea elettrica è a 400 Volt, 50 Hz 3 fasi + terra. All'interno del quadro gli ausiliari sono a 24 Volt CA con trasformatore dedicato.

### 3.2 Aeotermini

Il dimensionamento di massima degli aeotermini è stato eseguito considerando la potenza raccolta dal campo solare in corrispondenza della massima radiazione incidente sugli specchi del campo solare. È stato considerato come valore massimo una ANI di  $863 \text{ W/m}^2$ , alla quale corrisponde la massima portata di olio pari a circa 2.2-2.3 kg/s e una potenza trasferita al fluido di 178 kW.

Come sopra menzionato, l'aerotermino AE1 ha la funzione di "utenza" e l'aerotermino AE2 riporta la temperatura del fluido termovettore nelle condizioni di ingresso del campo solare ( $290 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Come rappresentato in Figura 19, AE1 ha una potenza di esercizio nominale di 100 kW, con una portata di olio, che proviene dal campo solare, di 0.42 kg/s, una differenza di temperatura dell'olio tra ingresso e uscita di  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $320\text{-}220 \text{ }^\circ\text{C}$ ) e una portata d'aria ambiente (temperatura di progetto di  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ) pari a 1.6 kg/s.

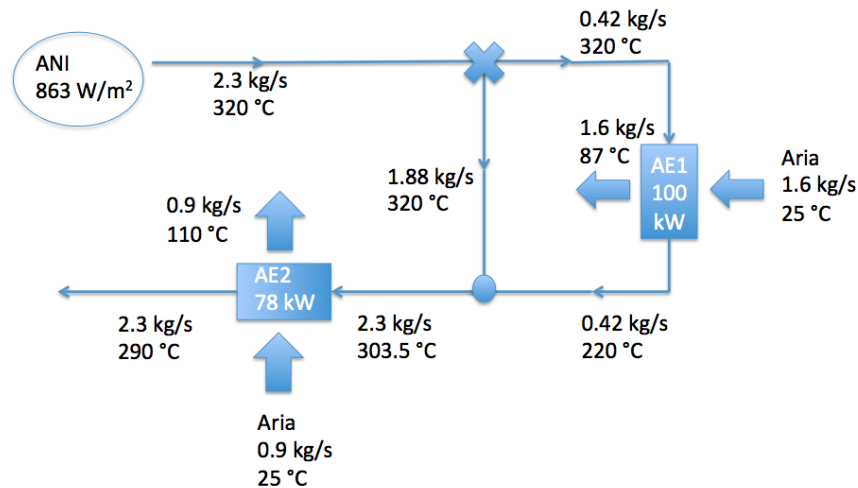


Figura 19. Schema semplificato di funzionamento di AE1 e AE2 con bilancio di materia e calore.

La portata di olio in uscita da AE1 viene successivamente miscelata con la portata di olio ( $1.88 \text{ kg/s}$ ) proveniente dal campo solare alla temperatura di  $320 \text{ }^\circ\text{C}$ . La risultante portata ( $2.3 \text{ kg/s}$ ), alla temperatura di  $303.5 \text{ }^\circ\text{C}$ , entra in AE2 e viene raffreddata fino a  $290 \text{ }^\circ\text{C}$ . AE2 smaltisce pertanto 78 kW a contatto con un flusso di aria ambiente ( $0.9 \text{ kg/s}$ ).

I due aeotermini sono pertanto dimensionati per smaltire, in condizioni nominali, una potenza di circa 100 kW ciascuno. Per l'aerotermino AE2, comunque, si assume una potenza massima di circa 120 kW, con una portata d'aria esterna di  $2 \text{ kg/s}$  ( $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ), al fine di garantire una maggiore flessibilità sul funzionamento dell'AE1. Entrambe le apparecchiature sono costituite da tubi alettati commerciali in configurazione cross-flow (Figura 20). I due ventilatori, uguali, hanno una portata d'aria variabile tra  $0.5$  e  $3.0 \text{ kg/s}$ . Gli aeotermini dovranno essere dotati di misuratori massici dell'aria entrante e da termocoppie che misurano la temperatura dell'aria entrante ed uscente dal banco tubi. La termocoppia che misura la temperatura dell'olio uscente dagli scambiatori interverrà sull'inverter che regola la frequenza del motore del ventilatore, e quindi la portata massica dell'aria prelevata dall'ambiente.

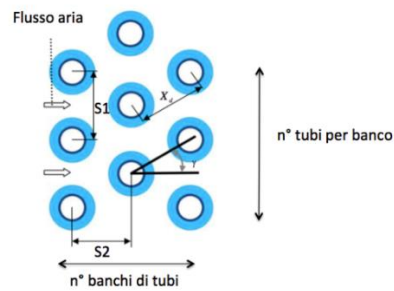


Figura 20. Esempio di disposizione cross flow dei tubi alettati con rappresentazione dei parametri progettuali  $s_1$  e  $s_2$ .

Per il dimensionamento di massima dei due aerotermi sono stati considerati tubi alettati commerciali, le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 3. Di seguito si riportano le caratteristiche progettuali assunte per i due aerotermi (Tabella 4, Tabella 5, Tabella 6, Tabella 7).

Tabella 3. Dimensionamento dei tubi alettati.

Parametro	U.M.	Valore
L	m	1.400
L tratto alettato	m	1.390
$D_i$ tubo	m	0.055
$D_e$ tubo	m	0.060
D con alette	m	0.114
$h$ aletta	m	0.027
$s$ aletta	m	0.001
$d$ tra alette	m	0.015
$n^\circ$ alette	-	93
$n^\circ$ banchi tubi	-	2
$n^\circ$ tubi per banco	-	9
$S_1 \cdot S_2$ distanza tra tubi	m	0.152
$Ac$ sez minima passaggio	$m^2$	1.177
$v$ max	m/s	1.284
$At$ sup totale tubo un settore	$m^2$	0.003
A area totale un settore	$m^2$	0.018
$A/At$	-	6.072
$h$ aletta/ $D$ con alette	-	0.236
$K_{AlSi 316}$	W/m °C	16.300
$a (s_1/De)$	-	2.527
$b (s_2/De)$	-	2.567
A tot esterna	$m^2$	34.133

**Tabella 4. Caratteristiche progettuali Aerotermo 1 (Lato aria).**

<b>Parametro</b>	<b>U.M.</b>	<b>Valore</b>
L <sub>camino</sub>	m	1.400
T <sub>in</sub> (temperatura aria ingresso)	°C	25.0
T <sub>out</sub> (temperatura aria uscita)	°C	87.1
rho (densità)	kg/m <sup>3</sup>	1058
C <sub>p</sub> (calore specifico)	J/kg/°C	1006
mu (viscosità dinamica)	Pa·s	0.0000199
K (conducibilità termica)	W/m °C	0.028
m (portata ponderale)	kg/s	1.600
Pr (Prandtl)		0.720
A (sezione di passaggio)	m <sup>2</sup>	1.960
Q (portata volumetrica)	m <sup>3</sup> /s	1.512
v (velocità)	m/s	0.772
Re (Reynolds)		4118
Nu (Nusselt) (HHED 2.5.3-12)		33.220
h <sub>aria</sub> (coefficiente scambio lato aria)	W/m <sup>2</sup> °C	15.308

**Tabella 5. Caratteristiche progettuali Aerotermo 1 (Lato olio).**

<b>Parametro</b>	<b>U.M.</b>	<b>Valore</b>
D <sub>e</sub> (diametro esterno tubo)	m	0.060
s (spessore)	m	0.003
D (diametro interno tubo)	m	0.055
T <sub>in</sub> (temperatura ingresso)	°C	320
T <sub>out</sub> (temperatura uscita)	°C	220
rho (densità)	kg/m <sup>3</sup>	831
C <sub>p</sub> (calore specifico)	J/kg/°C	2407
mu (viscosità dinamica)	Pa·s	0.00041
k (conducibilità termica)	W/m°C	0.098
m (portata ponderale)	kg/s	0.416
Pr (Prandtl)		10.022
A (sezione di passaggio)	m <sup>2</sup>	0.002
Q (portata volumetrica)	m <sup>3</sup> /s	0.001
v (velocità)	m/s	0.212
Re (Reynolds)		23566
h <sub>olio</sub> (coefficiente di scambio lato olio) <sup>1</sup>	W/m <sup>2</sup> .°C	259.769

<sup>1</sup> Calcolato applicando la correlazione di Dittus-Boelter per flussi turbolenti.



Dall'analisi effettuata nell'ambito del presente lavoro, per l'AE1 risulta una superficie di scambio termico globale A pari a 32.419 m<sup>2</sup>. Di seguito si riportano i risultati del dimensionamento dell'aerotermo AE2.

**Tabella 6. Caratteristiche progettuali Aerotermo 2 (Lato aria).**

<b>Parametro</b>	<b>U.M.</b>	<b>Valore</b>
L <sub>camino</sub>	m	1.400
T <sub>in</sub> (temperatura aria ingresso)	°C	25.0
T <sub>out</sub> (temperatura aria uscita)	°C	111.0
rho (densità)	kg/m <sup>3</sup>	1021
C <sub>p</sub> (calore specifico)	J/kg/°C	1006
mu (viscosità dinamica)	Pa-s	0.0000204
K (conducibilità termica)	W/m °C	0.029
m (portata ponderale)	kg/s	0.900
Pr (Prandtl)		0.717
A (sezione di passaggio)	m <sup>2</sup>	1.960
Q (portata volumetrica)	m <sup>3</sup> /s	0.882
v (velocità)	m/s	0.450
Re (Reynolds)		2257
Nu (Nusselt) [HHED 2.5.3-12]		22.437
h <sub>aria</sub> (coefficiente scambio lato aria)	W/m <sup>2</sup> °C	10.660

**Tabella 7. Caratteristiche progettuali Aerotermo 2 (Lato olio).**

<b>Parametro</b>	<b>U.M.</b>	<b>Valore</b>
D <sub>e</sub> (diametro esterno tubo)	m	0.060
s (spessore)	m	0.003
D (diametro interno tubo)	m	0.055
T <sub>in</sub> (temperatura ingresso)	°C	303.5
T <sub>out</sub> (temperatura uscita)	°C	290.0
rho (densità)	Kg/m <sup>3</sup>	810
C <sub>p</sub> (calore specifico)	J/Kg/°C	2503.8
mu (viscosità dinamica)	Pa-s	0.00041
k (conducibilità termica)	W/m°C	0.095
m (portata ponderale)	Kg/s	2.300
Pr (Prandtl)		10.770
A (sezione di passaggio)	m <sup>2</sup>	0.002
Q (portata volumetrica)	m <sup>3</sup> /s	0.003
v (velocità)	m/s	1.206
Re (Reynolds)		130434
h <sub>olio</sub> (Nu Dittus e Boelter) <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup> °C	1010.028

Dall'analisi effettuata nel presente lavoro, per l'AE2 risulta una superficie di scambio termico globale A pari a 32.482 m<sup>2</sup>.

Entrambi gli aerotermini devono essere corredati di un opportuno cammino di scarico aria, in modo che la temperatura di uscita cammino non superi i 45°C.

### 3.3 Tubazioni e valvole

Il sistema di tubazioni dell'impianto deve essere realizzato con tubi di diametro nominale NPS 1" ½ (equivalente DN 40) schedula 40, in acciaio al carbonio A106 grado B. In particolare le dimensioni nominali sono le seguenti: diametro esterno 48.3 mm, diametro interno 40.9 mm e spessore 3.7 mm. Tenendo conto della temperatura di progetto (350 °C) e di esercizio (320 °C), è necessario che i tubi prima della posa in opera siano sottoposti ad un trattamento esterno anti-corrosione mediante sabbiatura e applicazione di strato protettivo (primer).

Relativamente alle valvole, nel circuito verranno installate valvole DN 40 a globo a flusso avviato a vite esterna, esente manutenzione, serie PN 25, costruite con corpo e cavalletto in ghisa sferoidale EN-GJS-400-18-LT, interni in acciaio inox, tenuta a soffiutto, complete di indicatore di posizione, viti di bloccaggio, ingrassatore, vite limitatrice di alzata, comando manuale a volantino, attacchi flangiati secondo la norma EN1092-2 PN 25 con risalto. Occorre inoltre prevedere la stessa tipologia di valvole a flusso avviato, ma con diametri nominali DN 15 e DN 20, rispettivamente per le operazioni di sfiato/spurgo dell'aria e per il caricamento dell'olio nell'impianto.

Per una regolazione accurata della temperatura dell'olio diatermico nel buffer, occorre utilizzare una valvola deviatrice a 3 vie con caratteristica lineare, posizionata a valle della caldaia elettrica e comandata mediante una sonda di temperatura PT100 collocata nel buffer e azionata pneumaticamente. Le

<sup>2</sup> Calcolato applicando la correlazione di Dittus-Boelter per flussi turbolenti.

caratteristiche della valvola sono le seguenti: DN 40 PN 25, attacco attuatore con traversa (forma B), corpo in ghisa sferoidale EN-GJS-400-18-LT/ A 395, flange con superficie rialzata, forma B DIN EN 1092-2, materiale della sede in acciaio al Cr, materiale del tappo 1.4305, guarnizione a soffietto in acciaio al CrNiMo 1.4571, guarnizione a tenuta in PTFE. Un'ulteriore valvola deviatrice a 3 vie, con medesime caratteristiche, andrà installata a monte dell'aerotermosto AE1 per regolarne opportunamente la portata.

Per l'attuazione pneumatica della valvola a 3 vie, occorre prevedere la fornitura di aria compressa, partendo dalla centrale fino all'utenza presente sull'area di impianto, per una lunghezza complessiva di 35 m. La tubazione, con diametro nominale di ½ pollice (equivalente DN 15), diametro esterno di 21.3 mm e spessore di 2.3 mm, deve essere realizzata in acciaio zincato.

Nell'impianto sono previsti filtri raccoglitori di impurità a Y, DN 40 serie PN 25, costruiti con corpo e coperchio in ghisa sferoidale EN-GJS-400-18-LT, cestello in tela metallica di acciaio inox AISI 304, attacchi flangiati secondo la norma EN1092-2 PN 25 con risalto. Tali filtri vanno installati in aspirazione alle due pompe (pompa della caldaia elettrica e pompa di rilancio per il circuito sperimentale). Per la pompa di rilancio occorre prevedere una valvola DN 40 di ritegno (non ritorno) a disco tipo wafer (WCV), in acciaio austenitico.

### 3.4 Coibentazione

Ai fini del dimensionamento dello spessore del materiale isolante per il circuito idraulico di impianto, è stata effettuata un'analisi della dispersione termica e della temperatura superficiale della coibentazione attraverso un software disponibile online (Rockassist [4]). Il materiale coibente impiegato nella simulazione è lana di roccia, con densità maggiore di 100 kg/m<sup>3</sup> (come da norma EN 13470) e con conduttività termica riportata in Tabella 8 (secondo norma EN ISO 8497).

**Tabella 8. Conduttività termica della lana di roccia in funzione della temperatura.**

T °C	50	100	150	200	250	300	350
$\lambda$ W/mK	0.040	0.046	0.054	0.064	0.077	0.092	0.112

L'analisi è stata effettuata per il tratto di tubazione che va dall'uscita collettore CSP all'ingresso dell'aeroterma AE1 e per il tratto di tubazione dal buffer BU all'ingresso collettore CSP. Le condizioni operative assunte per i due segmenti di tubazione sono riportate in Tabella 9.

**Tabella 9. Condizioni operative nei tratti di interesse.**

TRATTO	U.M.	CSP – AE1	BU - CSP
Lunghezza tubazione	m	80	20
Temperatura operativa	°C	320	290

In Tabella 10 e in Tabella 11 si riportano i risultati del calcolo della temperatura superficiale esterna, delle perdite termiche lineari e superficiali, e della temperatura del fluido in uscita.

**Tabella 10. Calcolo della temperatura superficiale esterna, perdite termiche e temperatura del fluido nel tratto di tubazione CSP-AE1.**

Spessore isolamento (mm)	Temperatura superficie esterna (°C)	Perdite termiche lineari (W/m)	Perdite termiche (W/m <sup>2</sup> )	Temperatura fluido in uscita (°C)
20	100.9	167.0	602.1	317.27
30	80.4	129.4	380.4	317.88
40	68.8	108.8	269.9	318.21
50	61.3	95.6	205.3	318.43
60	56.1	86.5	163.6	318.58
70	52.3	79.7	134.7	318.69
80	49.3	74.4	113.7	318.78
90	46.9	70.2	97.8	318.85
100	45.0	66.7	85.5	318.90
110	43.4	63.8	75.6	318.95
120	42.1	61.3	67.6	318.99
130	40.9	59.1	61.0	319.03
140	39.9	57.2	55.5	319.06
150	39.0	55.5	50.8	319.09
160	38.3	54.0	46.7	319.11
170	37.6	52.7	43.2	319.13
180	37.0	51.5	40.1	319.15
190	36.4	50.4	37.4	319.17
200	35.9	49.4	35.0	319.19

**Tabella 11. Temperatura superficiale esterna, perdite termiche e temperatura del fluido nel tratto di tubazione BU-CSP.**

<b>Spessore isolamento (mm)</b>	<b>Temperatura superficie esterna (°C)</b>	<b>Perdite termiche lineari (W/m)</b>	<b>Perdite termiche (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Temperatura fluido in uscita (°C)</b>
20	91.4	142.8	515.0	289.41
30	73.5	110.8	325.7	289.54
40	63.4	93.2	231.2	289.62
50	56.9	82.0	176.0	289.66
60	52.3	74.2	140.2	289.69
70	48.9	68.3	115.5	289.72
80	46.3	63.8	97.5	289.74
90	44.2	60.2	83.9	289.75
100	42.6	57.2	73.3	289.75
110	41.2	54.7	64.9	289.77
120	40.0	52.6	58.0	289.78
130	39.0	50.7	52.4	289.79
140	38.1	49.1	47.6	289.80
150	37.3	47.7	43.6	289.80
160	36.6	46.4	40.1	289.81
170	36.0	45.2	37.1	289.81
180	35.5	44.2	34.5	289.82
190	35.0	43.2	32.1	289.82
200	34.6	42.4	30.1	289.83

La norma ASTM C1055 (Standard Guide for Heated System Surface Conditions that Produce Contact Burn Injuries) raccomanda che la temperatura superficiale del coibente venga sempre mantenuta al di sotto dei 60 °C (140 °F), anche se un valore accettato nella pratica è pari a circa 50 °C (120 °F), per ridurre il rischio di ustione per i lavoratori.

Pertanto, per garantire una temperatura superficiale inferiore ai 50 °C, lo spessore della coibentazione in lana di roccia deve essere pari a 100 mm. Trattandosi di un'installazione all'aperto è necessario applicare sulla coibentazione un rivestimento esterno realizzato in lamierino di alluminio da 1.0 mm di spessore, al fine di proteggere l'isolamento da polvere, danni meccanici e agenti atmosferici

### 3.5 Pompa di ricircolo

Per il dimensionamento e la definizione delle specifiche della pompa di ricircolo è stata effettuata l'analisi delle perdite di carico del circuito idraulico dell'impianto, facendo riferimento al layout riportato in Figura 21, dove è possibile distinguere due zone di impianto: campo solare e area SKID (Figura 22). In quest'ultima sono presenti: la pompa (viola), i due aerotermini (rosso), il riscaldatore elettrico (verde), il buffer (blu) e il vaso di espansione (giallo). In Tabella 12 si riporta la descrizione dei diversi segmenti che costituiscono il circuito sperimentale, con le lunghezze dei relativi tratti rettilinei e gli elementi che inducono perdite di carico concentrate.

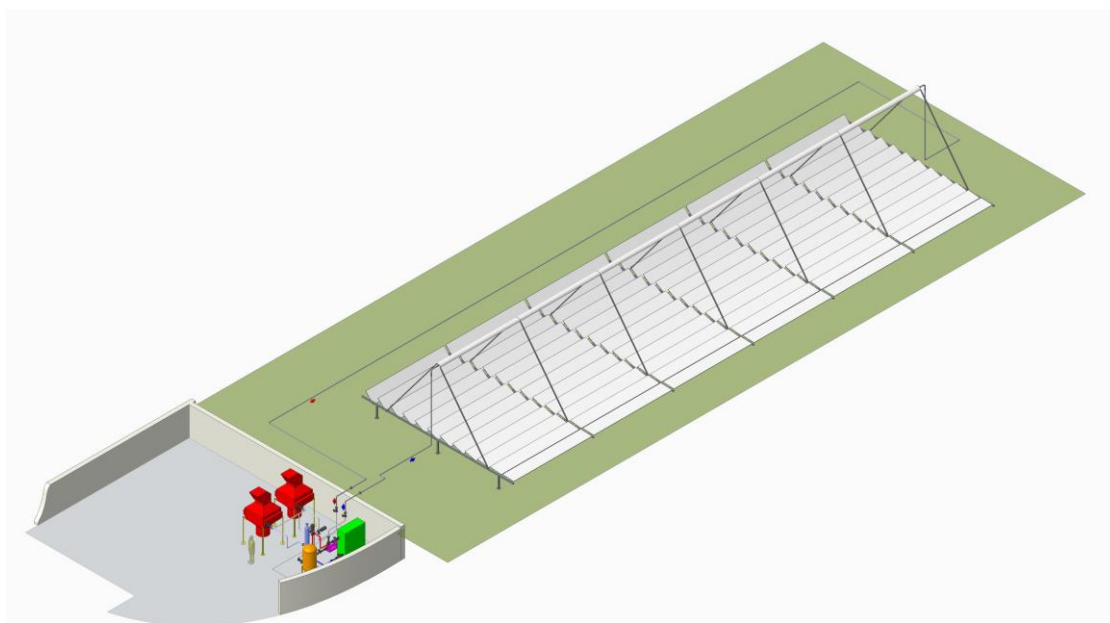


Figura 21: Layout dell'impianto ENEA-SHIP da realizzarsi presso il sito della Casaccia

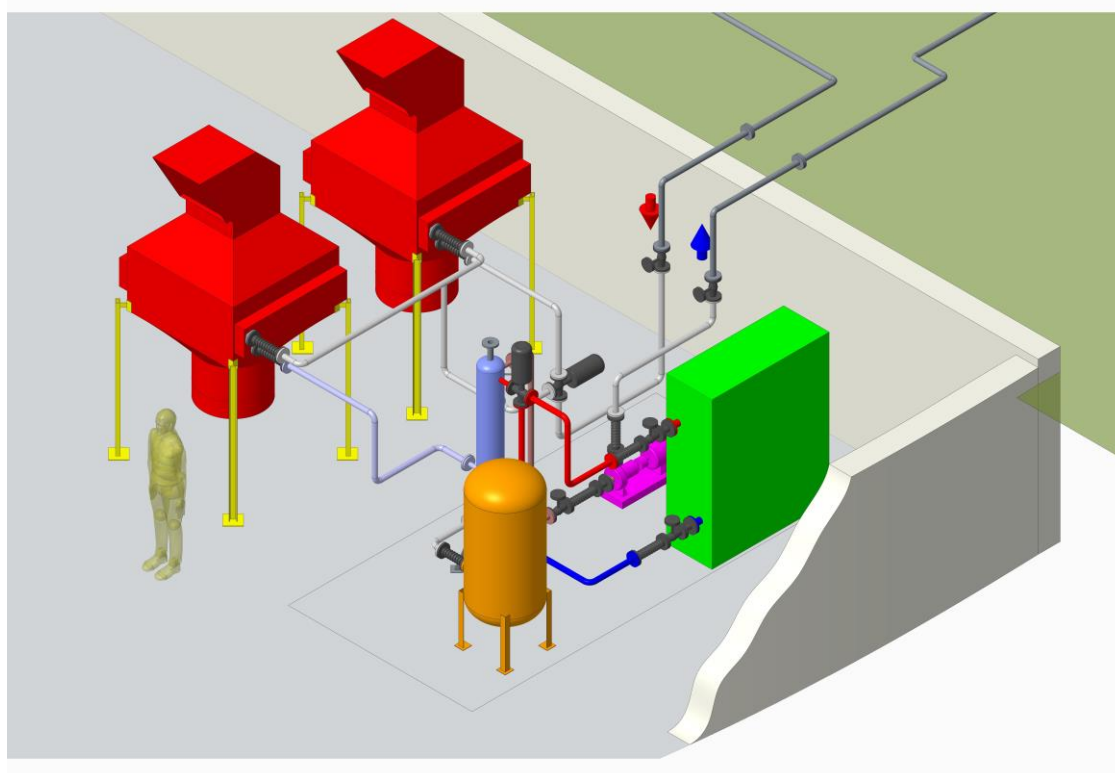


Figura 22: Layout dell'area SKID dell'impianto ENEA-SHIP

**Tabella 12. Descrizione dei segmenti costituenti il circuito sperimentale.**

Denominazione tratto da	a	Lunghezza (m)	Elementi di perdite di carico concentrate
Ingresso SKID	V3V Aerotermi	8.87	1 valvola a 3 vie + 2 gomiti 90° + 1 pozzetto termometrico
V3V Aerotermi	Aeroterma 1	0.91	5 raccordi 90° + 1 aumento di sezione
<b><u>Aeroterma 1</u></b>		17.28	17 gomiti a U
Aeroterma 1	Punto miscelazione	1.38	1 riduzione di sezione + 1 raccordo a 90° + 1 pozzetto termometrico + 1 T
V3V Aerotermi	Punto miscelazione	0.33	1 T
Punto miscelazione	Aeroterma 2	1.69	1 gomito 90°
<b><u>Aeroterma 2</u></b>		17.28	17 gomiti a U
Aeroterma 2	Buffer caldaia	1.90	1 riduzione di sezione + 2 gomiti 90° + 1 pozzetto termometrico + 1 ingresso serbatoio
Buffer	Pompa	4.50	1 uscita serbatoio + 1 gomiti 90° + 2 raccordi 45° + 1 pozzetto termometrico
Pompa	Uscita SKID	2.47	
Uscita SKID	Ingresso collettore	15.15	5 gomiti 90° + 1 aumento di sezione + 1 pozzetto termometrico
<b><u>Collettore</u></b>		38.00	Nessuno
Uscita collettore	Ingresso SKID	72.98	7 gomiti 90° + 1 riduzione di sezione + 1 pozzetto termometrico

Le perdite di carico distribuite, espresse in  $Pa$ , sono state valutate con la formula di Darcy-Weisbach:

$$R_{distr} = f \frac{L}{d_i} \frac{u^2}{2} \quad (6)$$

dove

- $L$  Lunghezza della tubazione ( $m$ )
- $u$  Velocità del fluido ( $m s^{-1}$ )
- $d_i$  Diametro interno della tubazione ( $m$ )
- $f$  Coefficiente di attrito, calcolato con la relazione di Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{\epsilon}{3.71 d_i} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (7)$$

- $\epsilon$  Rugosità della parete interna del tubo d'acciaio, pari  $0.0457 \text{ mm}$
- $Re$  Numero di Reynolds pari a

$$Re = \frac{\rho u d_i}{\mu} \quad (8)$$

- $\rho$  Densità media del fluido ( $kg m^{-3}$ )
- $\mu$  Viscosità dinamica media del fluido ( $Pa s$ )

Per le perdite di carico concentrate, la formula di Darcy-Weisbach viene espressa come di seguito riportato, dove la lunghezza equivalente  $L_{eq}$  è la lunghezza di tubazione che dà luogo a perdite di carico analoghe a quelle generate da una resistenza localizzata:

$$R_{conc} = f \frac{L_{eq}}{d_i} \frac{u^2}{2} \quad (9)$$



Nel presente lavoro i valori delle lunghezze equivalenti  $L_{eq}$  per le valvole, le curve e le variazioni di sezione sono stati determinati attraverso l'applicazione dell'abaco riferito al fluido termovettore Therminol 66, riportato in [5], dove la tipologia di resistenza localizzata viene individuata nella parte sinistra dell'abaco e la dimensione della tubazione nella parte destra.

In particolare, le perdite di carico dovute ai pozzetti termometrici (Figura 23) sono state valutate assimilando i pozzetti a valvole a saracinesca chiuse per  $\frac{1}{4}$  della sezione. Invece, per la valvola a 3 vie presente in ingresso agli aerotermi, la perdita di carico è stata calcolata tramite il coefficiente di portata  $K_v$ , riportato nella scheda tecnica della Samson AG per la valvola Type 3535 DN 40. Successivamente, con un  $K_v$  pari a 20 e una portata di  $10.45 \text{ m}^3/\text{h}$ , la perdita di carico è risultata essere pari a 27.3 kPa.

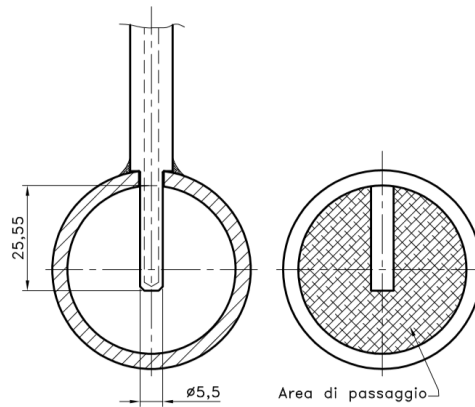


Figura 23. Schema di un pozzetto termometrico.

La caduta di pressione associata all'altezza geodetica del tubo ricevitore rispetto alla pompa posizionata sullo SKID è pari a

$$R_c = \rho g \Delta z \quad (10)$$

dove

$\Delta z$  corrisponde alla quota del tubo ricevitore rispetto al piano della pompa, pari a 9 m.

Nel calcolo delle perdite di carico sono state prese in considerazione tubazioni da 1"  $\frac{1}{2}$  schedula 40 per tutto l'impianto, ad eccezione dei due aerotermi (1"  $\frac{1}{2}$  schedula 10) e del collettore solare (70 mm con spessore 2 mm). Con riferimento alle condizioni operative riportate in Figura 19, a regime il fluido termovettore viene inviato al campo solare ad una temperatura di 290 °C e viene riscaldato nel collettore fino a 320 °C. All'uscita dal campo solare il fluido viene raffreddato attraverso il passaggio nei due aerotermi fino ad una temperatura di 290 °C. Per il calcolo delle perdite di carico è stato considerato il seguente intervallo di portata complessiva:

- 0.75 kg/s corrispondente ad una ANI minima di  $300 \text{ W/m}^2$ ;
- 2.3 kg/s corrispondente ad una ANI di  $863 \text{ W/m}^2$ .

In Tabella 13 si riportano i valori delle velocità minime e massime, delle corrispondenti cadute di pressione e prevalenze, calcolati in funzione della portata complessiva del fluido termovettore. Le velocità minime si registrano all'interno del collettore mentre quelle massime nelle tubazioni 1"  $\frac{1}{2}$  schedula 40. Anche nelle condizioni di velocità minime si instaura comunque un regime di flusso turbolento ( $Re$  pari a circa 36000).

**Tabella 13. Velocità massime e minime, caduta di pressione e prevalenza del circuito al variare della portata con tubazioni da 1" ½.**

Tubazione	Portata (kg/s)	Velocità max (m/s)	Velocità min (m/s)	Caduta di pressione (bar)	Prevalenza (m)
1" ½ sch40	0.75	0.72	0.27	1.04	10.6
	1.00	0.96	0.36	1.27	13.0
	2.00	1.92	0.73	2.80	28.6
	2.30	2.21	0.84	3.45	35.2

La pompa di circolazione di cui dotare l'impianto deve elaborare una portata di 10.45 m<sup>3</sup>/h con una prevalenza cautelativa superiore del 20% rispetto al valore massimo calcolato (42 m). Per ragioni economiche, di robustezza e semplicità di manutenzione, per questa specifica applicazione è stata selezionata una pompa del tipo centrifuga.

Per i valori di portata e prevalenza indicati, i diagrammi di Figura 24 e Figura 25 suggeriscono che la pompa idonea è del tipo 50-32-200.1, con un diametro della girante pari a 180 mm, azionata da un motore a 2 poli con frequenza di funzionamento pari a 50 Hz.

In Figura 26 si riporta la caratteristica esterna del circuito all'avviamento e a regime. Per l'avviamento (curva in grigio) è stata considerata la portata minima di 0.75 kg/s e 3 temperature del fluido a freddo (10, 15 e 20 °C). A regime, la caratteristica esterna del circuito è stata parametrizzata in funzione della portata veicolata sull'aerotermo AE1. Occorre considerare la curva in azzurro quando il fluido non viene inviato all'aerotermo AE1, mentre nel caso in cui tutta la portata attraversi l'aerotermo AE1 si fa riferimento alla curva in arancione.

Inoltre, in Figura 26 si riportano le curve caratteristiche della pompa a diversi numeri di giri  $N$ , ossia a diverse frequenze di funzionamento, ottenute con la legge di affinità per la portata  $Q$  e la prevalenza  $H$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (11)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (12)$$

Il numero di giri  $N$  è legato alla frequenza  $f$  e al numero di poli  $n_p$  dalla relazione

$$N = \frac{120 f}{n_p} \quad (13)$$

In Figura 27 si riporta la potenza richiesta all'albero dalla pompa in funzione della portata e al variare della frequenza. Considerando che la potenza assorbita all'albero in condizioni nominali è di circa 2.26 kW, e stimando un rendimento del motore elettrico pari al 90% e un margine di sicurezza del 15%, la taglia del motore deve essere almeno pari a 3 kW.

10 Etanorm/SYT/V, Etabloc/SYT, Etanorm/R, RSV

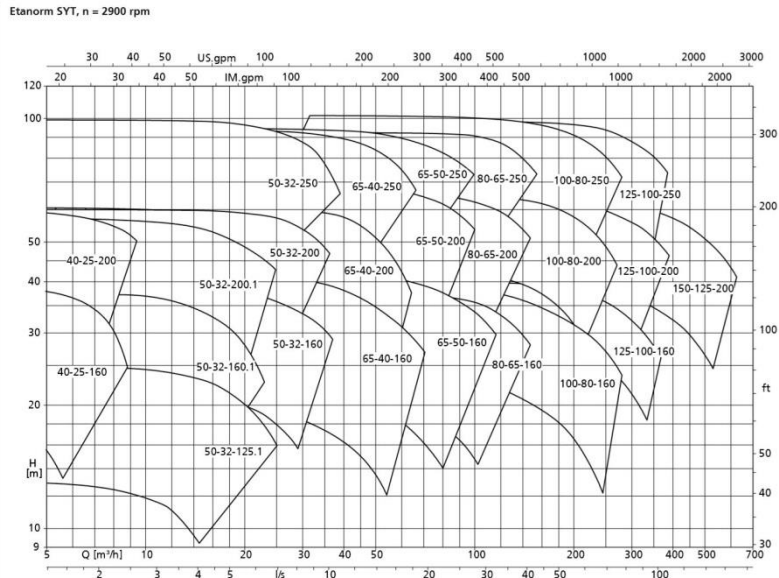


Figura 24. Famiglie di pompe per olio diatermico [6].



Centrifugal Pumps with Shaft Seal  
Standardised Water Pump / Thermal Oil and Hot Water Pump

Etanorm 050-032-200.1, n = 2900 rpm  
Etanorm SYT, Etanorm V, Etabloc, Etabloc SYT

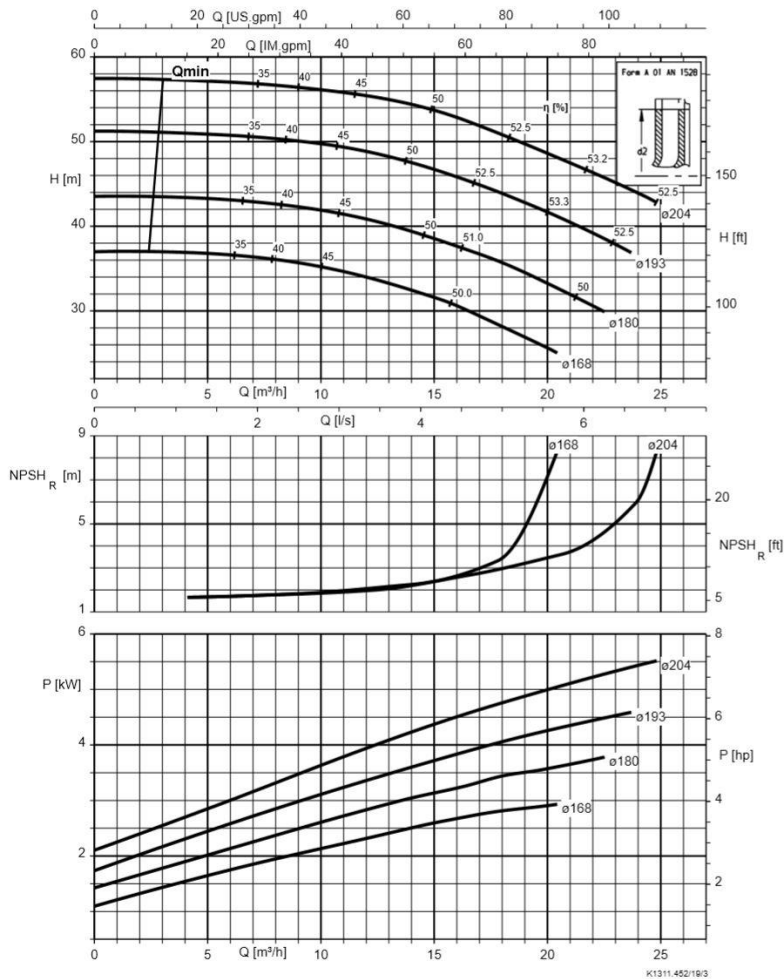


Figura 25. Prestazioni delle pompe del tipo 50-32-200.1 [6].

KSB Centrifugal Pumps with Shaft Seal  
Standardised Water Pump / Thermal Oil and Hot Water Pump

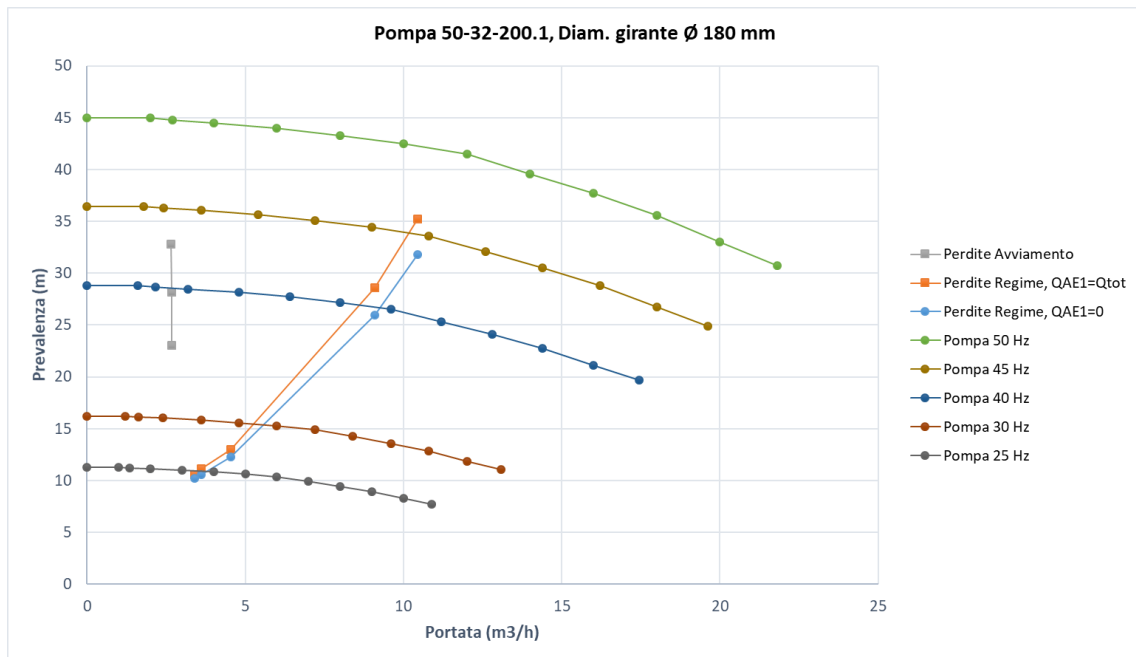


Figura 26. Caratteristica interna della pompa 50-32-200.1 con girante  $\varnothing$  180 mm al variare della frequenza.

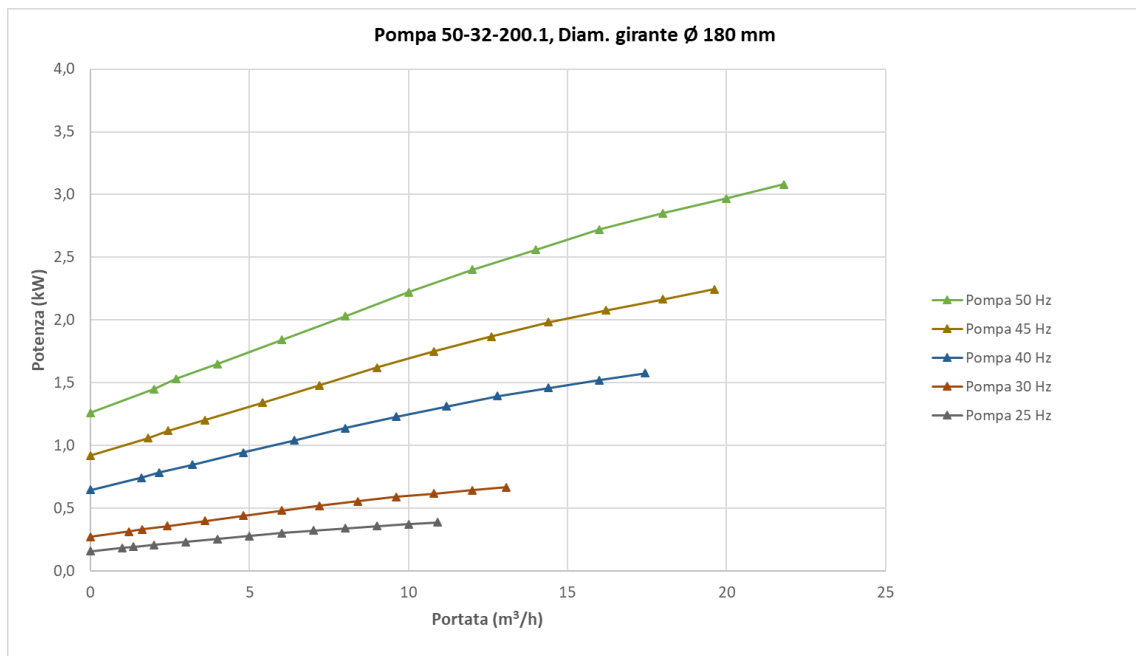


Figura 27. Potenza richiesta all'asse della pompa 50-32-200.1 con girante  $\varnothing$  180 mm al variare della frequenza.

### 3.6 Vaso di espansione

Il vaso di espansione ha la funzione di compensare la dilatazione termica dell'olio contenuto nell'impianto e allo stesso tempo di mantenere la pressurizzazione entro i limiti stabiliti.

All'avviamento dell'impianto l'olio è a temperatura ambiente (20 °C) con una densità di 1008 kg/m<sup>3</sup>. A regime l'olio raggiunge la temperatura massima di esercizio pari a 320 °C, a cui corrisponde una densità di 792 kg/m<sup>3</sup>. È buona norma scegliere il vaso di espansione in modo tale che l'olio occupi il 25% del volume a temperatura ambiente e il 75% del volume in normali condizioni operative. In questo modo, nel primo caso, installando il serbatoio presso la tubazione di ritorno, in corrispondenza dell'aspirazione della pompa di circolazione, si assicura un battente idrostatico sufficiente a tenere il circuito in leggera sovrappressione evitando la formazione di vapore; mentre nel secondo caso si evitano eventuali traboccamenti.

La variazione  $\Delta V$  dell'olio diatermico da 20 a 320 °C può essere valutata come

$$\Delta V = \left( \frac{\rho_{20}}{\rho_{320}} - 1 \right) V_0 \quad (14)$$

essendo  $\rho_{20}$  e  $\rho_{320}$ , rispettivamente, la densità a 20 °C e a 320 °C dell'olio diatermico,  $V_0$  il volume iniziale dell'olio nell'impianto a temperatura ambiente. Tipicamente tale variazione deve rappresentare il 50% del volume del vaso di espansione. Considerando un volume del buffer BU pari a 100 l e quello della caldaia elettrica di 75 l, la quantità di olio circolante nell'impianto risulta pari a circa 600 litri ( $V_0$ ): di conseguenza il corrispondente  $\Delta V$  è pari a circa 160 l ed il volume del vaso di espansione deve essere almeno di 320 l. Tenendo presente che i) eventuali aggiornamenti dell'impianto su lato collettore e/o utenze comporterebbero un aumento della quantità d'olio, ii) è buona norma scegliere una taglia per il vaso di espansione immediatamente superiore tra quelli commercialmente disponibili, la capacità del vaso di espansione deve essere pari a circa 500 l.

Il vaso di espansione deve essere installato all'aperto e inserito in corrispondenza della tubazione di ritorno dell'olio in caldaia (olio più freddo). Il collegamento tra il vaso di espansione e la tubazione deve essere realizzato con un tubo di sezione sufficientemente piccola, in modo da evitare moti convettivi all'interno del tubo stesso, e priva di coibentazione.

Per evitare il problema dell'ossidazione dell'olio e in considerazione del fatto che il vaso di espansione non può essere installato nella parte più alta dell'impianto, occorre utilizzare un vaso di espansione chiuso con cuscinetto di azoto che possa esercitare una sovrappressione sull'impianto. La pressurizzazione serve anche per evitare la formazione di vapore nel caso di piccoli abbassamenti di pressione nei punti più alti dell'impianto o sulle tubazioni in aspirazione.

Il vaso di espansione deve essere verticale con piedi per l'installazione a pavimento, in lamiera di acciaio di qualità e collaudato secondo la direttiva PED 6 bar a 350 °C. Il vaso di espansione deve inoltre essere dotato di termometro per la misura della temperatura dell'olio e di indicatore di livello, nonché di dispositivo di allarme e di blocco di massima temperatura, di minimo e di massimo livello. Inoltre deve essere presente un termostato che rilevi la temperatura dell'olio e che blocchi la caldaia elettrica, in caso di sovratemperatura. I livellostati ed i pressostati devono interrompere l'apporto di calore alla caldaia elettrica con blocco automatico e riarmo manuale da prevedere sul quadro di comando.

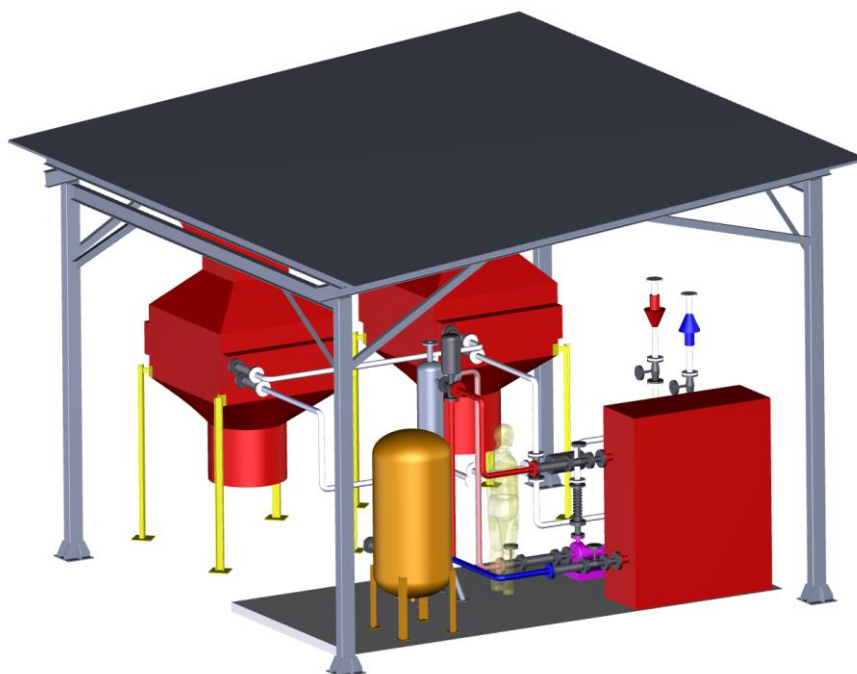
### 3.7 Carpenteria

Per l'impianto ENEA-SHIP sono necessarie opere di carpenteria per la realizzazione di una struttura di protezione degli elementi presenti nell'area SKID (Caldaia elettrica, vaso di espansione, buffer, pompa di rilancio) e degli elementi adiacenti (aerotermini e quadri elettrici) (Figura 28).

La struttura portante, fissata a terra, deve essere realizzata con travi in profilato (tipo IPE, HEA, ecc.) di acciaio strutturale. Per assicurare adeguata protezione metallurgica ed elettrochimica, le travi devono essere sottoposte a trattamento di zincatura per immersione. Il peso della struttura è stato stimato pari a circa 1750 kg.

La copertura deve essere realizzata con pannelli tipo sandwich composti da due lamiere in acciaio zincato a caldo e un pannello interno di poliuretano espanso, per uno spessore totale di 35 mm. La superficie della copertura è pari a circa 6.0 m x 6.0 m (36 m<sup>2</sup> complessivi).

Gli elementi dello SKID devono essere fissati su una superficie, pari a 2.5 m x 5.0 m, realizzata con grigliati tipo elettroforgiati in acciaio zincato a caldo. I moduli dei grigliati hanno le seguenti caratteristiche: larghezza barra portante pari a 1000 mm, lunghezza tondino di collegamento pari a 500 mm e piatto portante con altezza 25 mm e spessore 2 mm. La maglia dei moduli deve essere pari a 25x76 mm, cioè piatti portanti ogni 25 mm e tondino di collegamento ogni 76 mm. Il peso complessivo dei grigliati ammonta a circa 250 kg.



**Figura 28. Struttura per la protezione dell'area SKID, aerotermi e quadri elettrici.**

Sono da includere nelle opere di carpenteria gli staffaggi di sostegno per le tubazioni, realizzati in acciaio zincato. Al di fuori dell'area SKID, occorre prevedere l'installazione degli staffaggi ogni 2-3 metri. Il peso degli staffaggi è stato stimato in 250 kg.

### 3.8 Campo solare

Il campo solare sarà costituito da un collettore solare di tipo Fresnel che dovrà rispondere alle seguenti caratteristiche minime riportate di seguito (Tabella 14):

**Tabella 14. Caratteristiche e specifiche minime del collettore solare.**

	<b>u.m.</b>	<b>Valore</b>
Efficienza ottica minima attesa	%	64
Caratteristiche tubi ricevitori	-	Tipo ASE HCEO12
Orientamento collettore		E-O
Interfaccia con DCS di impianto PCS		Algoritmo inseguimento autonomo, possibilità di acquisizione dati e attuazione misure di emergenza quale de-focolizzazione
Temperatura ingresso campo solare con ANI MAX	°C	290
Temperatura uscita campo solare con ANI MAX	°C	320
Portata olio con ANI MAX	kg/s	2.3
Portata olio con ANI minima	kg/s	0.75
Portata olio ANI nulla	kg/s	0.75
Potenza termica con (ANI) di riferimento	kWt	159.0
Potenza termica con (ANI) di picco	kWt	178.0
Potenza termica con (ANI) minima	kWt	58.5

La superficie massima di occupazione del collettore sarà di 40 m x 20 m nell'area adiacente alla pre-esistente piattaforma sperimentale PCS (Prova Collettori Solari), dedicata alla caratterizzazione e qualificazione di materiali e componenti per la tecnologia dei collettori parabolici lineari a sali fusi. Ciò consentirà non solo di beneficiare delle infrastrutture di trasmissione e distribuzione dell'elettricità e del sistema di acquisizione dati e controllo già presente sull'impianto PCS, ma di realizzare una piattaforma sperimentale polifunzionale per il solare a concentrazione, che offra diverse opzioni tecnologiche e soluzioni ingegneristiche utilizzabili nell'ambito di molteplici scenari applicativi.

L'area di installazione è un piazzale asfaltato con profilo planare intermezzato con alcun baggioli di cemento armato. L'installazione del collettore solare deve essere corredata della relazione tecnica strutturale e di tutte le altre relazioni e certificazioni necessarie per l'esercizio del collettore.

L'obiettivo del progetto strutturale è ottimizzare a livello tecnico ed economico i seguenti fattori:

- Oneri di manodopera per il montaggio: la struttura dovrà presentare caratteristiche di ripetitività, semplicità e rapidità di installazione;
- Razionalizzazione dei materiali impiegati: il progetto, nel rispetto della normativa vigente, dovrà massimizzare il rendimento strutturale dei vari elementi, ricercando una combinazione ottimale di schemi geometrici, sezioni e caratteristiche di resistenza;
- Adattabilità della struttura: il terreno di fondazione del collettore in progetto potrebbe presentare variabilità nelle caratteristiche morfologiche e geotecniche del suolo superficiale. Per ridurre gli oneri di manodopera, è opportuno mantenere per quanto possibile inalterata la tipologia delle strutture in elevazione e di fondazione, garantendo al contempo la necessaria

“flessibilità” dello schema adottato, al fine di ottemperare alle verifiche di resistenza nelle varie condizioni di esercizio (ENEA fornirà i carichi eolici caratteristici del sito).

Riguardo alle fondazioni sono da preferirsi fondazioni di tipo a vite, mentre altri tipi di fondazioni saranno esaminati ed approvati in fase di progettazione esecutiva (ENEA fornirà le caratteristiche geotecniche del suolo di installazione)

La fornitura di un collettore Fresnel che consentirebbe anche la circolazione di sali fusi sarà oggetto di valutazione nella fase di esame dell’offerta tecnica.

### 3.9 Sintesi specifiche dei componenti

Sulla base degli elementi forniti nei precedenti paragrafi, di seguito si riporta una Tabella sintetica delle specifiche dei principali componenti di impianto.

**Tabella 15. Sintesi delle specifiche tecniche dei principali componenti di impianto.**

Componente	Tipologia	Dimensioni	Capacità massima	Condizioni operative	Note
<b>Collettori Fresnel</b>	Tubi ricevitori sotto vuoto tipo ASE HCEO12	Massima estensione campo solare 40 x 20 m	178 kW per una portata di 2.3 kg/s e una ANI di 863 W/m <sup>2</sup> ; Efficienza ottica attesa 64%	ANI di 863 W/m <sup>2</sup> ; ΔT max: 30°C; T <sub>in</sub> : 290°C; Potenza: 178 kW; Portata: 2.3 kg/s.  ANI di 300 W/m <sup>2</sup> ; ΔT min: 30°C; T <sub>in</sub> : 290°C; Potenza: 58.5 kW; Portata: 0.75 kg/s.	Fondazioni tipo vite Krinner
<b>Caldaia Elettrica</b>	Caldaia a resistenze elettriche immerse	700 x 1600 x 2000 mm	100 kW	Preriscaldamento olio fino a 290 °C	
<b>Aerotermo 1</b>	Scambiatore olio-aria	Superficie di scambio termico globale A pari a 32.419 m <sup>2</sup>	100 kW		Materiale batteria scambio calore: Acciaio A105
<b>Aerotermo 2</b>	Scambiatore olio-aria	Superficie di scambio termico globale A pari a 32.482 m <sup>2</sup>	100 kW		Materiale batteria scambio calore: Acciaio inox 304
<b>Buffer</b>	Serbatoio di scambio tra circuito solare e riscaldatore		100 litri		
<b>Tubazioni circuito</b>	1" ½ schedula 40				Materiale: Acciaio A106 gr. B
<b>Valvole</b>	Valvole a flusso avviato PN 25	DN 15, DN 20 e DN 40			Materiale corpo: Ghisa sferoidale EN-GJS-400-18-LT
<b>Valvole deviatrici</b>	Valvola deviatrice a 3 vie PN 25	DN 40			Materiale corpo: Ghisa Sferoidale EN-GJS-400-18-LT
<b>Valvola di ritegno</b>	Valvola di ritegno a	DN 40			Materiale: Acciaio austenitico



Componente	Tipologia	Dimensioni	Capacità massima	Condizioni operative	Note
	disco tipo wafer				
<b>Filtro raccogliatore</b>	Filtro raccogliatore di impurità a Y PN 25	DN 40			Materiale corpo: Ghisa sferoidale EN-GJS-400-18-LT
<b>Coibente</b>	Lana di roccia e lamierino di alluminio	Spessore 100 mm + 1.0 mm			
<b>Pompa</b>	Pompa Centrifuga per olio diatermico alta temperatura			Qmin: 0.75 kg/s Qmax:2.3 kg/s Hmin: 10 m Hmax: 35 m T < 350 °C	
<b>Vaso espansione</b>	Verticale, chiuso, pressurizzato con azoto		500 litri		Materiale: Acciaio al carbonio

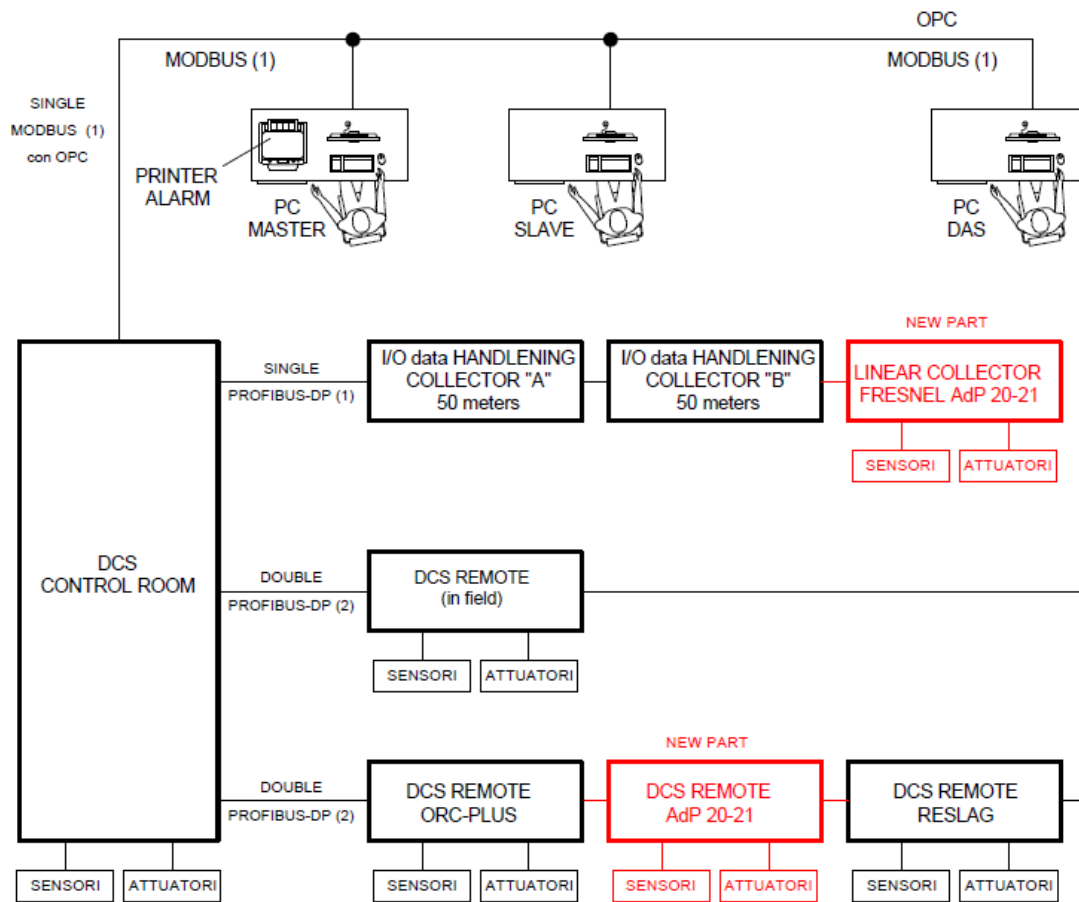
## 4 Sistema di controllo e acquisizione dati

Il controllo e l'acquisizione dei dati del circuito sperimentale ENEA-SHIP verrà 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 avrà 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, saranno poi acquisiti in maniera separata per evitare interferenze con la gestione di impianto.

Lo schema concettuale dell'architettura del sistema DCS è riportato in Figura 29, 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).



**Figura 29. Schema generale dell'architettura del sistema DCS per la piattaforma sperimentale ENEA-SHIP/PCS.**

Questa configurazione di sistema, con l'aggiunta di un nuovo quadro DCS Remoto per la parte dedicata all'impianto ENEA-SHIP (AdP-2021), consentirà di utilizzare la strumentazione (Hardware e Software) già in uso presso l'impianto PCS, limitando i costi di investimento del nuovo impianto.

L'aggiunta di un nuovo quadro DCS dedicato inoltre consentirà la simultanea gestione dei diversi impianti afferenti alla medesima sala controllo anche ad opera di un solo addetto.

I segnali acquisiti attraverso l'OPC verranno registrati e archiviati in un PC dedicato al processamento e all'analisi dei dati.

#### 4.1 Sistema DCS

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

- Rete di comunicazione esterna: è la rete Ethernet con cui l'ENEA Casaccia si interfaccia con il mondo esterno.
- Rete di comunicazione locale MODBUS: è la 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 sarà 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: è 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 potrà 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 secondi rispetto all'ora ufficiale locale, con aggiornamento automatico, e dovrà fare sempre riferimento all'ora Solare.
- Quadro DCS: armadio in campo per l'I/O dei segnali da acquisire.

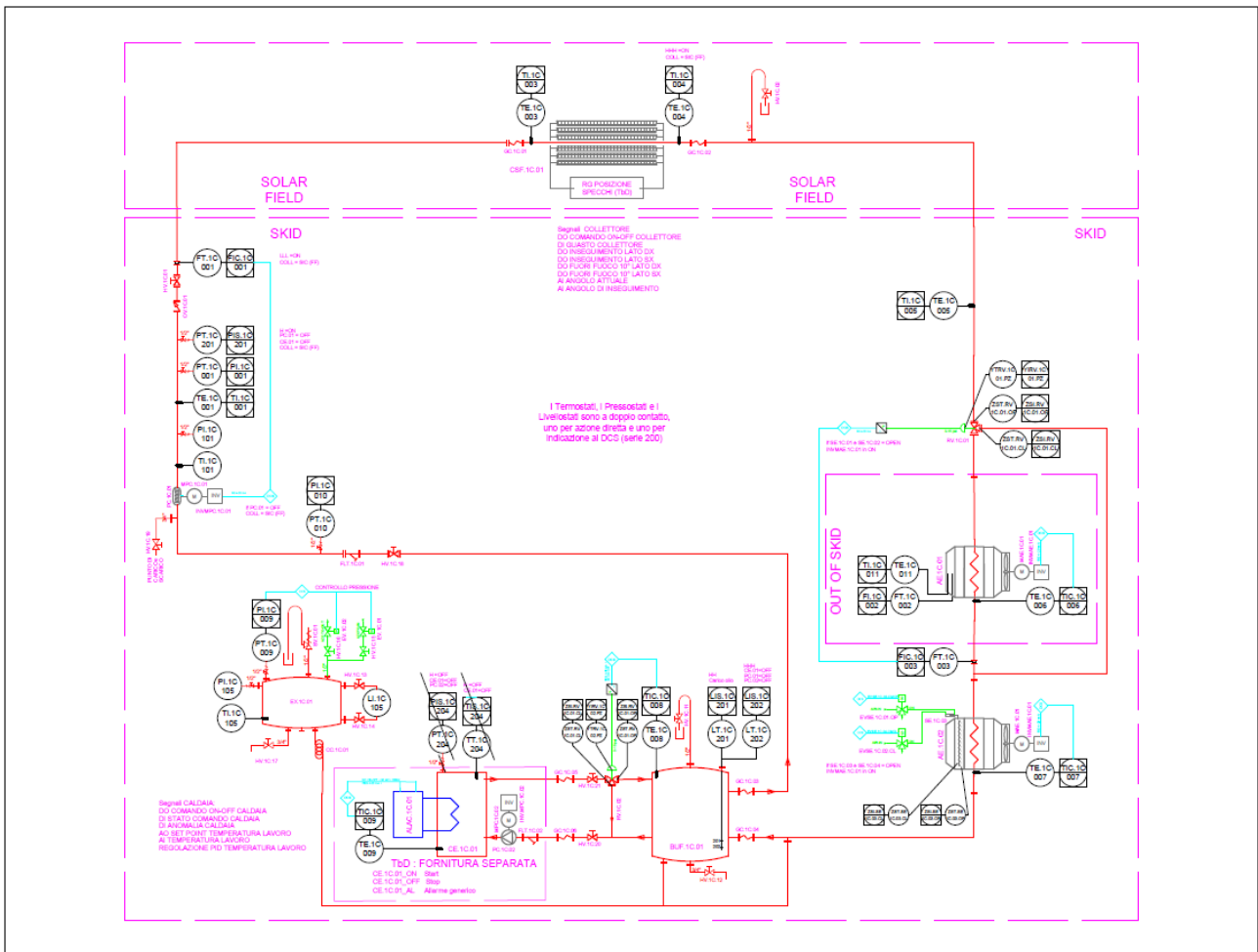
Il numero di canali previsto al DCS è circa pari a 70 I/O, di cui 14 AI (4-20 mA), 8 AI (TC-K), 6 AO (4-20 mA), 28 DI e 14 DO. In fase di programmazione verranno selezionati alcuni segnali da archiviare in modo veloce mentre i rimanenti saranno archiviati in modo lento.

I canali veloci avranno un rateo di acquisizione di 10 Hz/s a canale, mentre quelli lenti avranno un rateo di acquisizione di 1 Hz/s per canale.

Il software di acquisizione degli I/O dovrà interfacciarsi con il sistema di gestione e controllo del DCS 800M, cioè con il GRAPHIS BUILDER 800XA 5.1, il quale è basato su sistema operativo Windows 7 e, attraverso OPC SERVER, comunica con il software LabView per il post-elaborazione dei dati.

#### 4.2 Parti strumentali

La strumentazione utilizzata per il controllo del processo e l'acquisizione dei dati sperimentali, assieme alle interconnessioni tra le apparecchiature, è riportata nel P&ID (Figura 30), al quale si riferiscono tutte le grandezze e catene di misura. Per quanto riguarda le regolazioni delle catene di controllo ed acquisizione dati, esse andranno implementate nel sistema di supervisione e controllo dell'impianto PCS.



**Figura 30. Schema P&ID dell’impianto ENEA-SHIP.**

La strumentazione di impianto dovrà essere di massima robustezza e affidabilità, sia alle condizioni ambientali normali e sia alle condizioni operative previste, e dovrà garantire:

- facile manutenzione;
- caratteristiche di precisione di tipo laboratorio/industriale;
- buona immunità ai disturbi elettromagnetici.

Data la particolarità dell’applicazione, sarà comunque necessario, in molti casi, ricorrere a strumentazione di tipo speciale.

Le catene di misura previste sono dei seguenti tipi:

1. Misure di temperatura;
2. Misure di pressione;
3. Misure di portata;
4. Indicatori locali;
5. Sicurezze;

Di seguito si riportano le caratteristiche di ciascuna categoria di misura.

#### 4.2.1 Misure di temperatura

Le misure di temperatura, su tubazione o su buffer, sono effettuate tramite un pozzetto termometrico, chiuso nella parte a contatto con il processo (filettatura femmina da 1/8 GAS-F). Il pozzetto viene saldato alla tubazione con un inserimento pari alla metà del diametro della tubazione mentre viene 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 viene avvitato un tubo inox filettato 1/4 GAS M-M di lunghezza tale da uscire dalla coibentazione.

Al tubo viene 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. La termocoppia dovrà toccare il fondo del pozzetto, mentre il suo stelo sarà 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.

Tali misure possono essere di acquisizione, regolazione e di sicurezza secondo quanto previsto nel progetto.

#### 4.2.2 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.

#### 4.2.3 Misure di portata

Nell'impianto ENEA-SHIP vengono effettuate due misure di portata:

- Una misura riferita al circuito olio tramite un misuratore in linea fra flange del tipo VORTEX.
- Una misura riferita alla portata aria in uscita dal primo aerotermosto tramite un misuratore ad inserzione.

Tali misure possono essere di acquisizione, regolazione e di sicurezza, secondo quanto previsto nel progetto.

#### 4.2.4 Indicatori locali

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

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

#### 4.2.5 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.

## 5 Impianto Elettrico

Il sistema elettrico dell'impianto ENEA-SHIP (

Figura 31) si sviluppa secondo uno schema radiale che si dirama dal quadro Q.D. AdP2019-2021 posizionato nella zona area componenti. Il quadro elettrico Q.D. AdP2019-2021 è alimentato da una linea proveniente dal quadro QD00 dell'impianto PCS, linea cavo 3/150mmq + T L = 50 m.

I parametri elettrici di impianto sono di seguito elencati:

- Alimentazione 380/220V da QD000 Utenza CE01 Cabina impianto PCS;
- Frequenza 50 Hz;
- Tensione concatenata B.T. 400 V;

- Tensione tra fase e neutro fase e terra 230 V;
- Tensione circuito di comando 24 V;
- Tensione circuito strumentazione di impianto 24 V cc;

La caduta massima di tensione per ogni circuito, misurata dal Quadro Bassa Tensione al punto più lontano, quando sia inserito il carico nominale, non dovrà superare il 2% della tensione a vuoto per tutti i circuiti. La densità di corrente nei vari conduttori non dovrà mai essere superiore a quella consentita dalle tabelle CEI-UNEL 35024/1, tenendo conto di un coefficiente di contemporaneità per le potenze installate.

Il quadro QD AdP2019-2020 alimenta singolarmente ogni utenza elettrica dell'impianto. Ciascuna linea è protetta da un interruttore differenziale. Il quadro è protetto da un interruttore magnetotermico generale.

Ogni linea di alimentazione viene protetta da adeguati interruttori automatici di tipo magnetotermico differenziale, capaci di garantire una adeguata selettività dell'impianto sia verticale che orizzontale. Con tale soluzione si raggiunge la massima continuità del servizio e la massima sicurezza nella gestione e manutenzione, in quanto l'intervento su una macchina/dispositivo non pregiudica il funzionamento delle altre parti dell'impianto. Le protezioni saranno selezionate in maniera tale da assicurare un intervento entro 0.02 s in tutti i punti dell'impianto.

Il quadro verrà realizzato con carpenterie metalliche con grado di protezione idoneo all'installazione in esterno. Tutti i dispositivi contenuti all'interno del quadro sono modulari ed alloggiati su apposito supporto DIN e le linee di alimentazione verranno allacciate su apposita morsettiera.

Il quadro di distribuzione AdP.2019-2020 provvederà ad alimentare le seguenti utenze di impianto:

- Pompa di ricircolo (6 kW) - cavo 3x6mm<sup>2</sup> + T:L 30 m;
- Aeroterma AE1 (5.5 kW) - cavo 4x4mm<sup>2</sup> + T:L 30 m;
- Aeroterma AE2 (5.5 kW) - cavo 4x4mm<sup>2</sup> +T:L 30 m;
- Quadro caldaia (120 kW) - 4x95mm<sup>2</sup> +T:L 30 m;
- Alimentazione quadro movimentazione collettore (5.5 kW380Vac) - cavo 4x4 mm<sup>2</sup> +T:L 100 m;
- Alimentazione quadro movimentazione collettore CSF.1C.02 (5.5 kW380Vac) cavo 4x4 mm<sup>2</sup> +T; L 100 m;
- Alimentazione Armadio DAS - cavo 2x4 mm<sup>2</sup> + T:L 30 m;
- Alimentazione Elettrovalvole AE1 (0,5kW 220Vac) - cavo 2x2.5 mm<sup>2</sup> + T:L 30 m;
- Alimentazione Elettrovalvole AE2 (0.5kW 220Vac) - cavo 2x2.5 mm<sup>2</sup> + T:L 30 m;
- Alimentazione Elettrovalvole caldaia (0.5kW 220Vac) - cavo 2x2.5 mm<sup>2</sup> + T:L 30 m;
- Alimentazione misuratore di portata FIC.1C.001/002/003 (1kW 220 Vac) - cavo 2x2.5 mm<sup>2</sup> + T:L 30 m;
- Pompa caldaia (1 kW) - cavo 2x2.5 mm<sup>2</sup> + T:L 30 m.

Le linee di alimentazione dovranno essere fornite in opera complete di conduit protettivi ed ogni altro accessorio per la loro installazione a regola d'arte.

Le linee della distribuzione primaria saranno realizzate con cavi, unipolari con guaina e/o multipolari, con isolamento idoneo all'applicazione.

I circuiti secondari e terminali saranno realizzati con cavi unipolari di tipo idoneo all'applicazione.

I circuiti terminali saranno posati in tubazioni in PVC di tipo corrugato pesante per uso esterno.

Il sistema di distribuzione sarà del tipo TN-S (conduttori di neutro e protezione separati).

### 5.1 Percorsi dei cavi di potenza/comando

La distribuzione della alimentazione ai vari dispositivi elettrici avverrà mediante passerelle porta cavi metalliche e stacchi con guaina metallica flessibile isolata in prossimità dell'utilizzatore.

Il percorso dei cavi di comando tra l'organo comandato e la consolle verrà realizzato con passerelle porta cavi metalliche provviste di coperchio.

La distribuzione dei cavi di strumentazione tra strumenti di impianto e Consolle avverrà mediante proprie passerelle porta cavi metalliche provviste di coperchio.

All'interno delle passerelle porta cavi non saranno consentite giunzioni di cavi. I cavi appartenenti a sistemi diversi saranno posati in canalizzazioni distinte.

Il dimensionamento della rete elettrica è stato effettuato calcolando ogni ramo della rete in funzione delle correnti di impiego, determinate partendo dai dati nominali degli apparecchi

## 5.2 Impianto terra

L'impianto di terra sarà realizzato con i conduttori di protezione (PE) delle varie linee di alimentazione. La sezione dei vari conduttori di protezione sarà pari alla sezione dei conduttori di fase per le linee di alimentazione fino ad una sezione di 16 mm<sup>2</sup> oltre la metà del conduttore di fase. Tutti i conduttori di protezione faranno capo al collettore di terra dei relativi quadri di distribuzione, che a loro volta faranno capo al collettore generale dell'impianto di terra dell'infrastruttura PCS. Il sistema disperdente, coordinato con gli interruttori differenziali, permetterà di avere una  $R_t \leq 50$  ohm.

Tutte le masse metalliche saranno collegate a terra mediante conduttore di protezione giallo/verde di opportuna sezione (min. 16 mm<sup>2</sup>).

Saranno inoltre installati appositi conduttori, ove necessario, per la equipotenzializzazione delle masse metalliche di sezione minima di 16 mm<sup>2</sup>. Le strutture metalliche ove verrà installato l'impianto saranno collegate all'impianto di terra PCS, con appositi conduttori di equipotenzializzazione.

Il quadro Q.E.AdP.EP.01 sarà collegato all'impianto di terra per mezzo del conduttore di protezione PE del cavo di alimentazione da quadro distribuzione impianto PCS situato in cabina. Le utenze saranno collegate all'impianto di terra tramite il proprio conduttore giallo/verde di protezione PE. I tubi metallici saranno collegati all'impianto di terra tramite conduttori giallo/verde di protezione PE tipo N07G9-K 1x6mm<sup>2</sup>

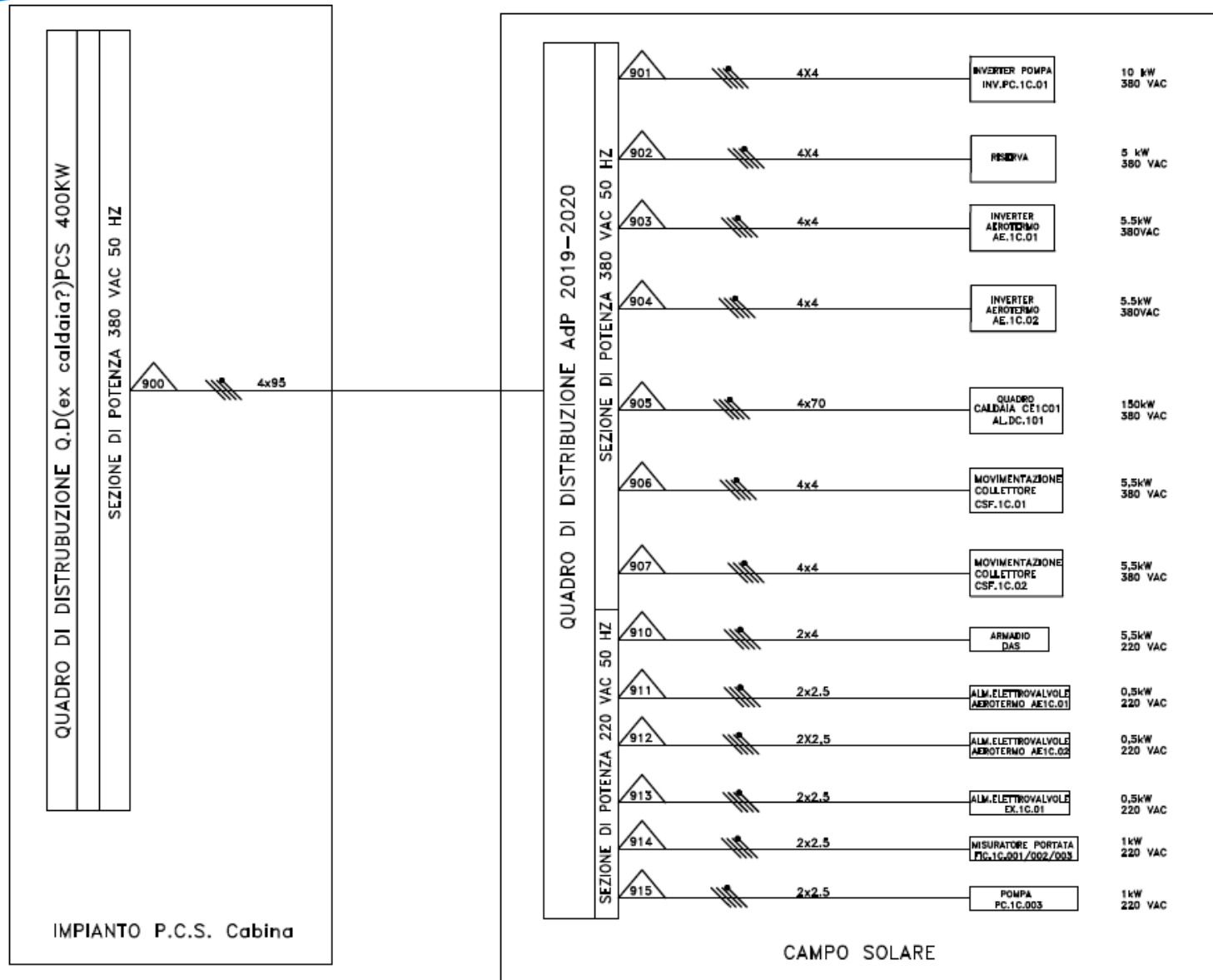


Figura 31. Schema a blocchi Impianto Elettrico ENEA-SHIP (AdP2019-2021)



## 6 Conclusioni

La produzione e la fornitura di calore a medio/alta temperatura da solare a concentrazione può rappresentare una soluzione efficace per promuovere la decarbonizzazione del settore industriale e può essere attuata attraverso soluzioni tecnologiche prevalentemente già consolidate, da ottimizzare per le specifiche applicazioni. Al momento la diffusione di tale tecnologia è frenata dalla sostanziale eterogeneità del settore industriale, caratterizzato da processi che richiedono calore a diverse temperature, differenti carichi termici e taglie di impianto. La sfida risiede, pertanto, nello sviluppo di soluzioni tecnologiche CST versatili, espandibili e facilmente integrabili, che possano rispondere alle specificità dei singoli processi industriali, pur mantenendo semplicità di esercizio, stabilità di funzionamento e ridotti costi operativi e di manutenzione. Tali soluzioni tecniche vanno testate e validate sul campo, in condizioni operative reali, per consolidare la confidenza del mondo industriale nella tecnologia CST e per promuoverne una diffusione su larga scala. A questo scopo, nell'ambito del PTR 2019-2021 per la Ricerca di Sistema Elettrico, è prevista la realizzazione di un'infrastruttura sperimentale presso il C.R. ENEA Casaccia, dedicata allo studio di soluzioni tecniche e configurazioni di impianto per la fornitura di calore di processo ad utenze industriali. Il circuito sperimentale sarà sostanzialmente costituito da una stringa di collettori lineari Fresnel, integrata con una caldaia elettrica per la modulazione delle temperature operative in ingresso al campo solare, e con un sistema di aerotermi per la simulazione dell'utenza in termini di temperature operative e di carichi termici. L'impianto sarà configurato come un circuito sperimentale flessibile e versatile, aperto a successive integrazioni e modifiche, e potrà beneficiare dell'integrazione (principalmente elettrica ed elettronica) con la pre-esistente piattaforma sperimentale PCS, dedicata alla caratterizzazione e qualificazione di materiali e componenti per la tecnologia dei collettori parabolici lineari a sali fusi. Nel presente Report è stato descritto il progetto definitivo dell'Impianto, elaborato da ENEA nell'ambito della LA1.36 sulla base di una dedicata analisi termica del campo solare (sito della Casaccia) e di simulazioni di processo in condizioni operative nominali e di off-design. In particolare l'impianto è stato progettato per operare sia con olio diatermico che con miscele di sali fusi: in una prima fase operativa si prevede di utilizzare olio diatermico del tipo Therminol 66, largamente adottato come fluido termico nei processi industriali. La superficie massima di occupazione del collettore è stata valutata pari a 40x20 m, con una superficie specchiante di circa 320 m<sup>2</sup>, e con 9 tubi ricevitore collegati in serie (del tipo ASE HCEO112). Le risultanti condizioni operative di funzionamento della stringa di collettori sono le seguenti: differenza di temperatura del fluido termico tra uscita e ingresso al campo solare pari a 30°C (con T<sub>in</sub>: 290°C); potenza massima e minima raccolta dal campo solare pari rispettivamente a 178 kW e 58 kW (con portata di 2.3 kg/s e 0.75 kg/s in corrispondenza di ANI pari a 863 W/m<sup>2</sup> e 300 W/m<sup>2</sup>, rispettivamente).

Sulla base della simulazione di processo e dei parametri operativi individuati per ciascun componente, sono state definite le caratteristiche operative e costruttive di tutti gli elementi di impianto (caldaia elettrica, aerotermino di processo, aerotermino di servizio, buffer, vaso di espansione, pompa di ricircolo, ecc) e sono state elaborate le specifiche del circuito idraulico, del sistema di acquisizione dati e controllo e del sistema elettrico. Tali dati sono stati utilizzati come base documentale per l'espletamento del bando di gara ai fini dell'assegnazione di un contratto di fornitura e messa in opera dell'impianto.

## 7 Riferimenti bibliografici

1. P. Krummenacher, B. Muster, “Solar process heat for production and advanced applications: Methodologies and software tools for integrating solar heat into industrial processes”, (2015).
2. G. N. Pardo, K. Vatopoulos, A. Krook-Riekkola, J. A. Moya River, A. Perez Lopez, “Heat and cooling demand and market perspective”, Publications Office of the European Union, (2012).
3. R. Kempener, “Solar Heat for Industrial Processes - Technology Brief”, (2015).
4. Disponibile on-line, <https://www.rockassist.com/>
5. Eastman, «Liquid phase systems design guide - A design, operating, and maintenance guide for low-cost, low-pressure heat transfer systems», Eastman Corporate Headquarters, 2019.
6. KSB, «Standardised Water Pump / Thermal Oil and Hot Water Pump – 50 Hz - Characteristic Curves Booklet», KSB SE & Co. KGaA, 2018.