

Ricerca di Sistema elettrico



Ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili – Analisi e progettazione preliminare di un prototipo di sistema di accumulo termoclino ibridizzato alimentabile da CSP e altre tecnologie FER, asservito all'impianto ENEA-SHIP, per la produzione di calore per processi industriali (LA1.11)

V. Russo, G. Petroni, G. Canneto, P. Di Ascenzi, C. Felici, P. Pagano, W. Gaggioli

Ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili – Analisi e progettazione preliminare di un prototipo di sistema di accumulo termoclino ibridizzato alimentabile da CSP e altre tecnologie FER, asservito all'impianto ENEA-SHIP, per la produzione di calore per processi industriali(LA1.11)

V. Russo, G. Petroni, G. Canneto, P. Di Ascenzi, C. Felici, P. Pagano, W. Gaggioli (ENEA)

Gennaio 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica – ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto: 1.9 "Solare termodinamico"

Linea di attività: LA1.11

Responsabile del Progetto: Antonio Guglielmo, ENEA

Responsabile del Work Package: Antonio Guglielmo, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Valeria Russo, ENEA

Mese inizio previsto: 1

Mese inizio effettivo: 1

Mese fine previsto: 18

Mese fine effettivo: 25

Indice

1	Risultati attesi	4
2	Risultati ottenuti.....	5
3	Prodotti attesi	6
4	Prodotti sviluppati	7
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	8
6	Sintesi delle attività svolte	10
7	Dettaglio delle attività svolte.....	11
7.1	Introduzione e dati di partenza.....	11
7.2	Parte meccanica e di processo	13
7.3	Parte elettrica	22
7.4	Parte strumentale	23
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	25
9	Pubblicazioni scientifiche	26
10	Eventi di disseminazione	27

Indice delle figure

Figura 1 – Campo solare dell’impianto CSP “ENEA-SHIP”	11
Figura 2 – Sinottico da DCS dell’impianto “ENEA-SHIP”	12
Figura 3 – a) in rosso l’area interessata dai lavori di realizzazione dell’impianto ibrido b) vista 3D della piattaforma sperimentale esistente	13
Figura 4 – Schema semplificato del nuovo impianto ENEA	14
Figura 5 – Flowsheet con bilancio di massa ed energia per il circuito della nuova sezione di impianto	15
Figura 6 – Disegno in sezione del serbatoio	17
Figura 7 – Dimensioni critiche di progetto per i tre scambiatori	18
Figura 8 – Disegni preliminari dei due scambiatori: a) vista in sezione dell’interno dello shell; b) vista 3D dello scambiatore di scarica; c) vista in sezione, d) vista in 3D dello scambiatore di carica	20
Figura 9 – Disegno 3D del serbatoio (a) vista esterna, (b) vista interna con i tre scambiatori e i relativi canali per la circolazione del sale	20
Figura 10 – a) Vista in sezione e vista dall’alto del serbatoio, b) vista 3D del coperchio	21
Figura 11 – Rappresentazione schematica semplificata del nuovo sistema di alimentazione elettrica per l’impianto ibrido	22
Figura 12 – Nuovo disegno P&ID impianto PTR Ibrido	23
Figura 13 – Schema generale dell’architettura del sistema DCS per il nuovo impianto PTR Ibrido	24

Indice delle tabelle

Tabella 1 – Dati acquisiti durante le prove sperimentali dell’impianto “ENEA-SHIP”	12
Tabella 2 – Bilanci di massa/energia per il circuito sezione 2 al variare della portata di olio tra 0.1 e 0.35 kg/s	16
Tabella 3 – Principale parametri fisici del serbatoio di accumulo del fluido (Sale ternario Hitec-XL)	17
Tabella 4 – Esempio di risultati ottenibili nell’analisi parametrica degli scambiatori usando come parametro la portata di olio	19

1 Risultati attesi

Come previsto dal capitolato di Progetto, dalla presente linea di attività LA1.11 si prevedeva di ottenere:

- Lo studio e la definizione di un prototipo di sistema di accumulo termico di tipo termoclino ibridizzato tra solare a concentrazione (CSP) e altre fonti energetiche rinnovabili per la produzione di calore per processi industriali;
- Progettazione preliminare per la realizzazione del prototipo di sistema di accumulo termico di tipo termoclino ibridizzato tra solare a concentrazione (CSP) e altre fonti energetiche rinnovabili per la produzione di calore per processi industriali;
- Pubblicazione del bando di gara e assegnazione del Contratto di Appalto per la fornitura /realizzazione dell'impianto sperimentale costituito dal prototipo di sistema di accumulo termico di tipo termoclino ibridizzato tra solare a concentrazione (CSP) e altre fonti energetiche rinnovabili per la produzione di calore per processi industriali.

2 Risultati ottenuti

I risultati ottenuti nell'ambito della presente linea di attività LA1.11 sono:

- È stato condotto lo studio per l'ibridizzazione di un impianto solare a concentrazione con altra fonte FER attraverso un sistema di accumulo a calore sensibile in cui come mezzo di accumulo termico viene usata una miscela ternaria di Sali.
- Il sistema è costituito da un serbatoio verticale contenente la miscela di sali che viene alternativamente riscaldata (fase di carica) o raffreddata (fase di scarica) mediante la circolazione di un fluido diatermico (olio Therminol-66) all'interno di 3 scambiatori di calore. Dei tre scambiatori due sono connessi al circuito dell'impianto CSP (ENEA_SHIP) già presente nel centro, ed uno a un nuovo circuito da realizzare dove un riscaldatore elettrico simula l'accoppiamento con impianti di produzione diretta di energia elettrica rinnovabile (fotovoltaico e/o eolico).
- Quindi lo scambiatore di calore inserito nel serbatoio può consentire il riscaldamento del mezzo di accumulo con differenti fonti energetiche e in tempi diversi realizzando il disaccoppiamento tra la fornitura di calore e la produzione di energia e mitigando la criticità costituita dalla intermittenza tipica delle fonti rinnovabili.
- È stata eseguita la progettazione preliminare del prototipo di sistema di accumulo termico di tipo termoclino studiato.
- È stato pubblicato il bando di gara, espletata la procedura amministrativa ed affidato il Contratto di Appalto per la fornitura/realizzazione dell'impianto sperimentale costituito dal prototipo di sistema di accumulo termico di tipo termoclino ibridizzato tra solare a concentrazione (CSP) e altre fonti energetiche rinnovabili per la produzione di calore per processi industriali.
- Il Contratto di Appalto di cui trattasi è stato affidato alla società NUOVA S.TE.I.M. S.r.l., con sede legale in Via Flaminia Ternana, 514 - 05035 Narni (TR) - CF/P.IVA 00555520550, per un importo complessivo di € 213.180,00 IVA esclusa (di cui € 4.500,00 per oneri relativi alla sicurezza non soggetti a ribasso).

3 Prodotti attesi

In accordo con il capitolato di Progetto, il prodotto atteso per la LA1.11 è il presente report.

4 Prodotti sviluppati

In accordo con il capitolato di Progetto, il prodotto sviluppato per la linea di attività LA1.11 corrisponde al presente report:

- V. Russo, G. Petroni, G. Canneto, P. Di Ascenzi, C. Felici, P. Pagano, W. Gaggioli, "Ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili - Analisi e progettazione preliminare di un prototipo di sistema di accumulo termocline ibridizzato alimentabile da CSP e altre tecnologie FER, asservito all'impianto ENEA-SHIP, per la produzione di calore per processi industriali", Gennaio 2024, Report RdS_PTR 22-24_PR 1.9_LA1.11_039.

Inoltre, è reso disponibile l'Allegato 1 al presente report:

- Allegato 1 - TERIN-STSN/2023/12 "Progetto definitivo realizzazione impianto ibrido solare a concentrazione e fotovoltaico", V. Russo, W. Gaggioli, G. Petroni, G. Canneto, P. Di Ascenzi, C. Felici.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

A causa di criticità tecniche (inerenti, tra l'altro, alla sicurezza del prototipo) e amministrative, non sono stati ottenuti entro il termine previsto del mese 18 (Giugno 2023) la pubblicazione del bando di gara e l'affidamento del Contratto di Appalto per la realizzazione del prototipo, incluso suo asservimento all'impianto "ENEA-SHIP" (da modificare appositamente nell'ambito dell'Appalto in oggetto), per ottenere un dimostratore tecnologico di un impianto CSP ibridizzato con altre tecnologie FER per la produzione di calore per processi industriali. Pertanto, la presente linea di attività LA1.11 è terminata in ritardo, al mese 25 (Gennaio 2024), ad affidamento del Contratto di Appalto avvenuto.

Di seguito si descrivono sinteticamente le criticità tecniche e amministrative occorse.

Per quanto riguarda le **criticità tecniche** occorse nello svolgimento della LA1.11, queste sono correlate a un ulteriore approfondimento relativo alla compatibilità tra la miscela di sali ternari (Hitec-XL), utilizzata come mezzo di accumulo nel prototipo di sistema di accumulo termoclino ibridizzato, e il materiale ipotizzato per la realizzazione del serbatoio di stoccaggio dei sali.

Posto l'obiettivo di minimizzare i costi del sistema di accumulo e considerato che le temperature di esercizio non superano i 350 °C, in fase di progettazione è stata presa in considerazione l'ipotesi di realizzare il serbatoio in acciaio al carbonio ASTM A516 Gr. 70, inserendo un layer di azoto in pressione nella parte alta del serbatoio.

Per convalidare la tecnologia in un ambiente industrialmente rilevante e al fine di evitare l'insorgenza di eventuali problemi collegati alla sicurezza del sistema di accumulo, come da prassi sono state eseguite delle prove di corrosione per confermare o meno la scelta del tipo di acciaio. Le prove di corrosione sono state eseguite su provini di acciaio al carbonio ASTM A516 Gr. 70 ed hanno evidenziato dei problemi. Sono state quindi effettuate nuove prove di corrosione su provini di acciaio inox AISI 316, scelto sulla base della sua facilità di reperimento sul mercato. Le ultime prove hanno dato esito favorevole all'utilizzo di questo tipo di acciaio per la realizzazione del prototipo di serbatoio di accumulo di tipo termoclino.

In conclusione, in merito alle problematiche tecniche, la ripetizione delle prove di corrosione e il tempo impiegato per capire, con indagini di mercato, quale tra le due soluzioni fosse la più appropriata al caso in esame hanno determinato un aumento dei tempi necessari per la progettazione del prototipo rispetto a quelli previsti.

Per quanto riguarda le **criticità amministrative** occorse nello svolgimento della LA1.11, il nuovo "Codice dei Contratti Pubblici", D.Lgs. n. 36/2023 e s.m.i., è stato pubblicato in Gazzetta Ufficiale il 31 marzo 2023 e ha sostituito il vecchio Codice, D.Lgs. n. 50/2016 e s.m.i., operativo da circa 7 anni. Il nuovo Codice ha acquisito efficacia solo dal 1° luglio 2023. Nel periodo tra la pubblicazione del nuovo Codice e la sua piena efficacia, il Legislatore ha previsto una fase transitoria durante la quale c'è stata una estensione della vigenza di alcune disposizioni del vecchio Codice. Questa convivenza tra vecchie e nuove norme ha ingenerato alcuni dubbi e perplessità circa le procedure da adottare che hanno determinato la necessità di approfondimenti tecnico-legislativi e, quindi, uno slittamento dei normali tempi per l'avvio della procedura amministrativa per la pubblicazione del bando di gara. Tali perplessità sono nate dall'abolizione della dicitura "progetto definitivo" e dall'introduzione del concetto di "progetto di fattibilità tecnico-economica" e dai relativi contenuti che quest'ultimo deve possedere nel caso di realizzazione di sistemi prototipali. Il nuovo Codice all'articolo 44 prevede la possibilità di affidare l'insieme della progettazione esecutiva e della realizzazione di un'opera purché la stazione appaltante tenga conto di eventuali scostamenti di costo nella fase esecutiva

dell'Appalto rispetto a quanto contrattualmente previsto, al contrario del vecchio Codice che all'articolo 59 1-bis e 1-ter, nel caso di sistemi prototipali ad alto contenuto tecnologico, prevedeva l'affidamento congiunto di "progettazione esecutiva" ed esecuzione dei lavori sulla base di un progetto definitivo senza fare alcun riferimento a valutazioni di rischi di scostamento di costi in fase realizzativa.

Concludendo, a parte il ritardo nella chiusura della LA1.11, causato dalle suddette criticità tecniche e amministrative, la LA1.11 è stata svolta senza scostamenti tecnici su attività e risultati.

In merito agli scostamenti economici, i costi totali (escluse spese generali) sostenuti e rendicontati per l'esecuzione della LA1.11, pari a circa 126,3 k€, sono minori rispetto a quelli a preventivo, pari a circa 130,3 k€. Le principali motivazioni degli scostamenti sono:

- I costi per strumenti, attrezzature e software specifico (cat. B) a consuntivo, pari a circa 6,1 k€, sono maggiori del preventivo, pari a circa 1,7 k€, a causa della maggior durata della LA1.11 rispetto a quella prevista (da 18 a 25 mesi) con maggior numero di giorni di utilizzo dei software acquistati (cfr. applicazione del criterio quota d'uso per determinazione costi ammissibili di cat. B).
- I costi di esercizio (cat. C) a consuntivo, pari a circa 51,6 k€, sono minori del preventivo, pari a 60 k€, per economie ottenute nella procedura di affidamento dell'appalto relativo alla realizzazione e fornitura di un prototipo di sistema di accumulo termico, di tipo termoclino a sali fusi, ibridizzato tra CSP e altre tecnologie FER (e sua implementazione nell'impianto sperimentale Fresnel "ENEA-SHIP" opportunamente modificato), con minor importo del relativo anticipo contrattuale.

Si ritiene, infine, di evidenziare quanto di seguito. I costi di personale (cat. A) sostenuti e rendicontati per la LA1.11, pari a circa 68,6 k€, sono allineati al preventivo. Tuttavia, oltre a detti costi di personale sostenuti e rendicontati per la LA1.11, ENEA ha sostenuto ma non ha potuto esporre a consuntivo, causa superamento del contributo totale massimo ammesso dal capitolato vigente di Progetto, ulteriori circa 12,9 k€ di costi di personale. Il totale dei costi di personale sostenuti da ENEA per la LA1.11 (costi sostenuti e rendicontati + costi sostenuti ma non esposti a consuntivo), pari a circa 81,5 k€, risulterebbe maggiore rispetto al preventivo a causa, tra l'altro, di: (i) maggior impegno di personale resosi necessario per superare le criticità tecniche e amministrative occorse nella LA1.11; (ii) nuovo inquadramento giuridico-economico, a far data dal 1/1/2023, con passaggio da ricercatore (costo std. Liv. Medio) a primo ricercatore (costo std. Liv. Alto), di n° 3 unità di personale rendicontata nella LA1.1. Tali maggiori costi di personale andrebbero a compensare i minori costi di esercizio sostenuti per la LA1.11 e, anzi, a far superare l'importo dei costi preventivati per la LA1.11 di circa 9 k€.

6 Sintesi delle attività svolte

In questa linea di attività è stato eseguito il progetto preliminare del serbatoio di accumulo a calore sensibile di tipo termoclino. Lo storage permette l'accoppiamento di un impianto CSP già esistente e di un nuovo circuito alimentato da energia elettrica proveniente da altra fonte FER per la fase di carica dell'accumulo. In questo modo si realizza un impianto ibridizzato tra solare CSP e fotovoltaico e/o eolico. Il lavoro ha riguardato i calcoli di bilancio massa/energia per la nuova configurazione di impianto, le modifiche alle linee di piping e ai componenti dell'impianto esistente e la definizione di un nuovo P&ID. Sono stati sviluppati dei codici per la simulazione degli scambiatori di carica e scarica definendone potenze e dimensioni, e realizzati i disegni tecnici preliminari per la costruzione. È stato progettato un nuovo sistema di acquisizione e controllo ed è stato redatto il computo metrico e la specifica tecnica che è stata allegata alla documentazione della procedura di gara di appalto che è stata espletata e, infine, affidata.

7 Dettaglio delle attività svolte

Per una descrizione dettagliata delle attività si rimanda all'“Allegato 1 – TERIN-STSN/2023/12 Progetto definitivo realizzazione impianto ibrido solare a concentrazione e fotovoltaico”.

7.1 Introduzione e dati di partenza

Le attività previste nella presente linea sono lo studio e la progettazione di tutti i componenti necessari alla costruzione di un impianto solare CSP ibridizzato con altra fonte FER.

L'obiettivo principale è quello di preparare una specifica tecnica completa da allegare alla gara d'appalto per la costruzione di tale impianto sperimentale e infine espletare la procedura di gara stessa.

La base di partenza del progetto è l'impianto “ENEASHIP”, già operativo presso il C.R. ENEA di Casaccia e lo studio ha riguardato principalmente la modalità di interfacciamento dei componenti di tale impianto con i nuovi componenti (meccanici, elettrici e strumentali) da realizzare, in particolare con un nuovo serbatoio di accumulo termico di tipo termoclino.

L'impianto “ENEASHIP” è una piattaforma sperimentale messa a punto nell'ambito del precedente PTR2019-2021. Il componente principale di tale piattaforma è un collettore lineare di tipo Fresnel. Tale collettore, avente una potenza di circa 190 kW di picco, utilizza come fluido termovettore il Therminol-66 la cui temperatura massima di lavoro è pari a circa 340°C.

Nella seguente Figura 1 è mostrata una vista del collettore solare Fresnel.



Figura 1 – Campo solare dell'impianto CSP “ENEASHIP”

La progettazione preliminare del nuovo impianto è stata condotta a partire dall'analisi dati del circuito esistente per stabilire le grandezze di processo. L'impianto CSP, come detto, fa uso di un olio diatermico che può lavorare in un range di temperatura tra la temperatura ambiente e circa 340 °C come valore massimo. Nella Tabella 1 sono riassunti i dati di funzionamento di una serie di prove condotte nei mesi scorsi sull'impianto.

Prova #		1	2	3	4	5	6
DNI (W/m2)		909.3	876.7	848.1	613.3	557.7	458.6
Temp. Ambiente (°C)		18.9	19.2	18.5	20.1	19.7	19.8
Velocità vento (m/s)		0.89	1.96	3.41	1.53	2.87	2.02
Portata (m3/h)		5.74	5.73	5.73	5.80	5.80	5.79
Tinlet solare (°C)	campo	290.2	289.9	290.3	291.3	291.2	288.0
Toutlet solare (°C)	campo	297.6	296.5	295.7	296.2	295.2	291.1
T mandata pompa		291.9	291.6	292.0	293.1	292.8	289.3
T ritorno (°C)		282.2	279.1	275.8	280.7	277.6	272.1

Tabella 1 - Dati acquisiti durante le prove sperimentali dell'impianto "ENEA-SHIP"

Nella Figura 2 è mostrato il sinottico dell'impianto.

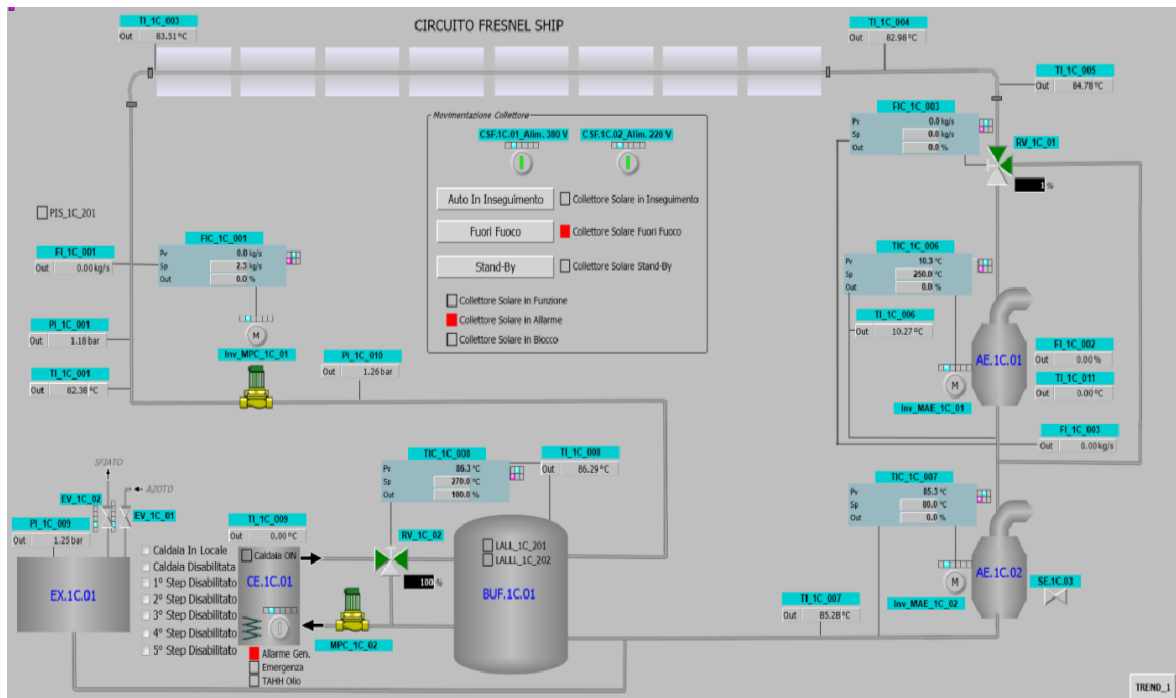


Figura 2 - Sinottico da DCS dell'impianto "ENEA-SHIP"

L'impianto ibrido che si vuole realizzare prevede la costruzione, accanto al circuito dell'impianto Fresnel, di un nuovo circuito funzionante sempre con il Therminol-66 e comprendente il nuovo serbatoio di accumulo termico ibridizzato, che costituirà l'interfaccia tra il circuito di nuova costruzione e quello già esistente.

7.2 Parte meccanica e di processo

Il serbatoio di accumulo, che sarà quindi comune ai due circuiti, sarà dotato al suo interno di scambiatori di calore tubo-mantello, e riempito con una miscela ternaria di sali (miscela Hitec-XL) adatta all'accumulo di calore sensibile. La miscela di sali viene alternativamente riscaldata (fase di carica) o raffreddata (fase di scarica) mediante la circolazione negli scambiatori di calore del fluido diatermico proveniente sia dal vecchio circuito in cui viene riscaldata tramite la radiazione solare sia dal nuovo circuito in cui potrà venire riscaldata mediante un riscaldatore elettrico (che potrà essere alimentato da fonte FER).

La miscela ternaria di sali scelta (Hitec-XL), ha composizione 42% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, 43% NaNO_3 , 15% KNO_3 , ha un punto di fusione nel range 130-140 °C, un limite superiore di stabilità intorno ai 530 °C ed infine presenta le seguenti proprietà fisiche:

- Densità (kg/m^3) = $-0.827 \cdot T + 2240$
- Calore specifico (J/kg K) = $-0.33563 \cdot T + 1545.54$
- Conducibilità termica (W/m K) = 0.519
- Viscosità (kg/m s) = $10^{6.1374} \cdot T^{-3.36406}$

L'impianto ibridizzato sarà sistemato in un piazzale in cemento armato nelle immediate vicinanze del collettore Fresnel esistente, come mostrato in Figura 3.

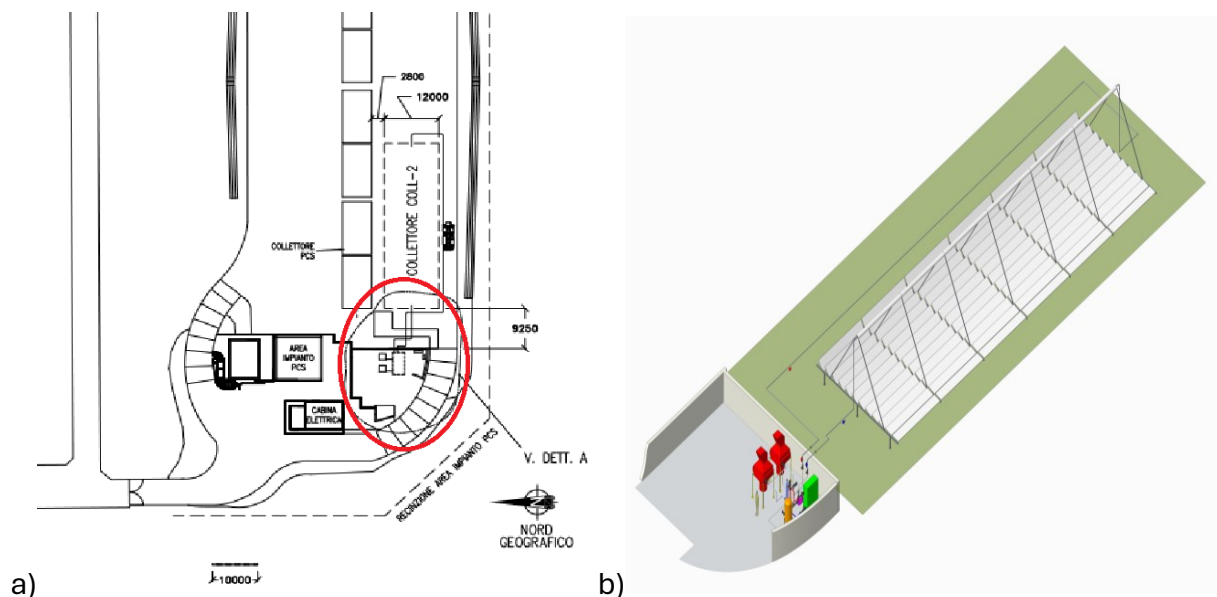


Figura 3 - a) in rosso l'area interessata dai lavori di realizzazione dell'impianto ibrido b) vista 3D della piattaforma sperimentale esistente

Per capire meglio come sarà composto l'impianto ibrido in Figura 4 è rappresentato uno schema di massima del processo che si realizzerà.

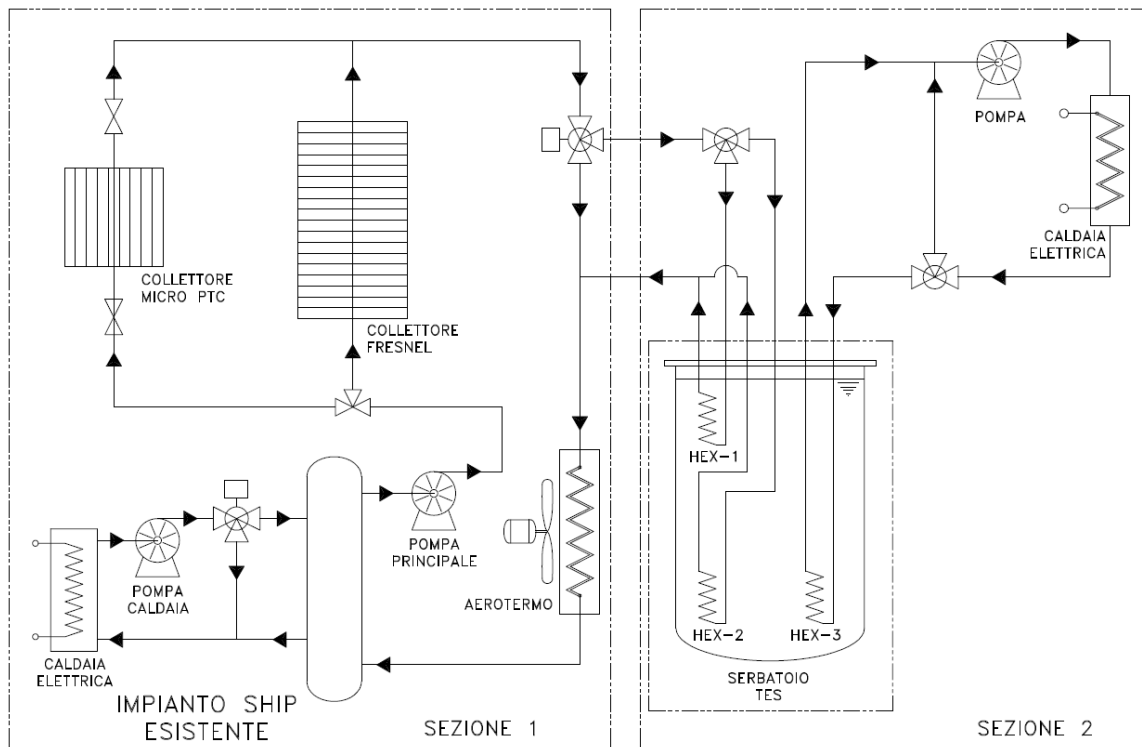


Figura 4 – Schema semplificato del nuovo impianto ENEA

Come visibile l'impianto prototipale risulterà suddiviso in due SEZIONI: la SEZIONE 1 comprendente l'esistente impianto solare Fresnel e la SEZIONE 2 che costituisce il nuovo circuito da realizzare. Il sistema TES ibridizzato di fatto costituirà l'elemento di raccordo tra i due circuiti. Come detto, durante il funzionamento dell'impianto la miscela di sale presente all'interno del serbatoio TES scambierà energia attraverso gli scambiatori (HEX-1, HEX-2 ed HEX-3) con l'olio diatermico che circola lato tubi. Il serbatoio di accumulo lavorerà in condizioni di pressione atmosferica nell'intervallo di temperature 190° - 320°C.

Sono state studiate diverse soluzioni di funzionamento per il processo nel circuito di sezione 2. Il circuito, come visibile in figura, comprende, oltre al serbatoio di accumulo, una pompa, necessaria per la circolazione del fluido, ed il riscaldatore elettrico che consente di simulare la presenza di un impianto di produzione di energia elettrica.

Quindi nel circuito in oggetto, il fluido diatermico aumenta la sua temperatura sfruttando l'energia elettrica per poi scambiare il calore all'interno del TES con la miscela di sali e consentire la carica dello storage termico.

Sono stati ricavati, al variare della portata circolante, diversi schemi di funzionamento con relativi bilanci di massa/energia. In Figura 5 è mostrato uno degli esempi di flowsheet implementati per il nuovo circuito e nella **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** sono mostrati i bilanci di massa energia ottenuti.

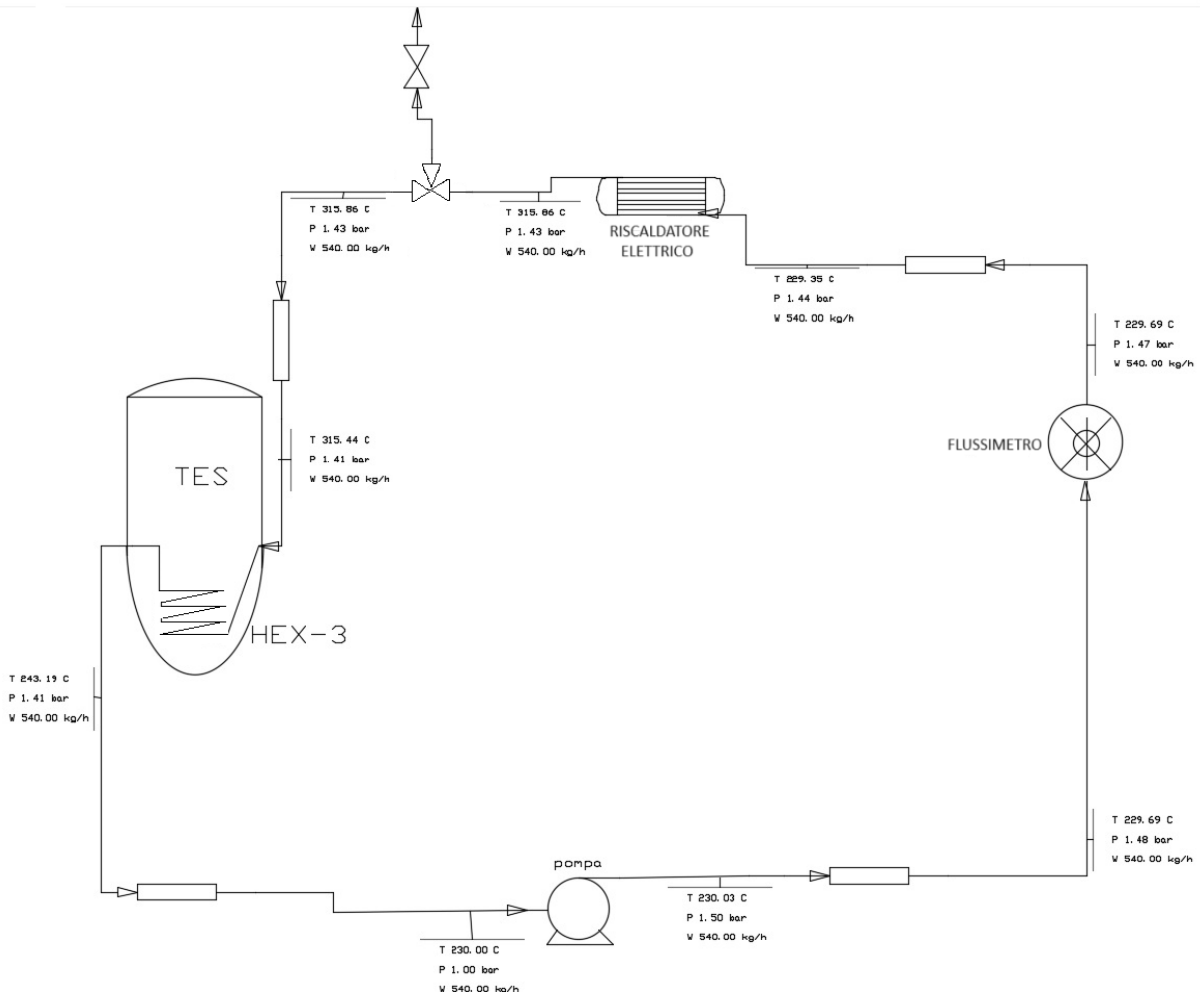


Figura 5 - Flowsheet con bilancio di massa ed energia per il circuito della nuova sezione di impianto

	In Pompa	Out Pompa	In Fluss	In Riscald	Out Riscald	In TES	Out TES
Portata [kg/h]	360	360	360	360	360	360	360
Temperatura [°C]	209	290	208.5	208	337.7	337.1	285.4
Pressione [bar]	1	1.5	1.48	1.46	1.45	1.44	1.4
Densità [kg/m ³]	879.32	879.3	879.6	879.9	778.7	779.3	821.2
Portata [kg/h]	540	540	540	540	540	540	540
Temperatura [°C]	209	209.02	208.71	208.39	297.58	297.15	249.9
Pressione [bar]	1	1.5	1.47	1.44	1.43	1.43	1.4
Densità [kg/m ³]	879.32	879.3	879.5	879.8	811.62	811.94	848.7
Portata [kg/h]	720	720	7250	720	720	720	720
Temperatura [°C]	209	209.02	208.71	208.5	276.6	276.3	230.3

	In Pompa	Out Pompa	In Fluss	In Riscald	Out Riscald	In TES	Out TES
Pressione [bar]	1	1.5	1.45	1.4	1.39	1.35	1.3
Densità [kg/m ³]	879.32	879.3	879.5	879.6	828.2	828.4	863.5
Portata [kg/h]	900	900	900	900	900	900	900
Temperatura [°C]	209	209.02	208.8	208.6	263.6	263.4	220.8
Pressione [bar]	1	1.5	1.43	1.36	1.35	1.29	1.25
Densità [kg/m ³]	879.32	879.3	879.4	879.57	838.2	838.4	870.56
Portata [kg/h]	1080	1080	1080	1080	1080	1080	1080
Temperatura [°C]	209	209.02	208.8	208.7	254.8	254.6	214.5
Pressione [bar]	1	1.5	1.41	1.31	1.3	1.2	1.2
Densità [kg/m ³]	879.32	879.3	879.4	879.5	844.9	845.13	875.28
1260	1260	1260	1260	1260	1260	1260	1260
Temperatura [°C]	209	209.02	208.8	208.7	248.4	248.3	210.5
Pressione [bar]	1	1.5	1.38	1.26	1.25	1.133	1.13
Densità [kg/m ³]	879.32	879.3	879.4	879.5	849.8	849.9	878.2

Tabella 2 – Bilanci di massa/energia per il circuito sezione 2 al variare della portata di olio tra 0.1 e 0.35 kg/s

A questo punto è stata effettuata la progettazione preliminare del serbatoio stesso e degli scambiatori necessari a realizzare, entro i limiti imposti, gli scambi di energia.

Riguardo al serbatoio sono state studiate opportune modifiche da apportare ad un serbatoio esistente, le cui dimensioni geometriche permettono di poter far funzionare il circuito della sezione 2 con valori di portata entro quelli simulati. Ovviamente i tempi di carica/scarica saranno compatibili con le tipiche ore di funzionamento dell'impianto e quindi le superfici di scambio degli scambiatori saranno tali da garantire l'operatività giornaliera dell'impianto.

Nella Figura 6 viene mostrata una vista in sezione del serbatoio preso come riferimento e a partire da questo schema si sono apportate le modifiche, in particolare sulla parte superiore del vessel, per permettere l'inserimento dei nuovi scambiatori previsti.

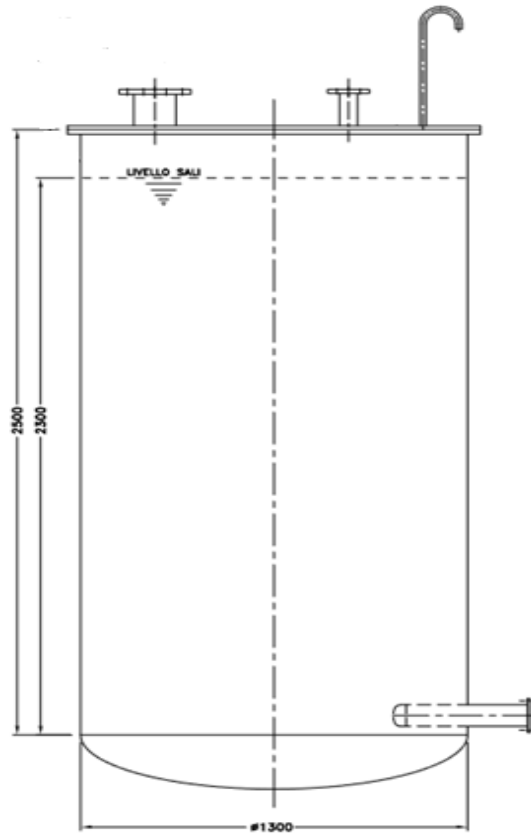


Figura 6 – Disegno in sezione del serbatoio

Definite quindi le principali dimensioni (diametro ed altezza) geometriche del vessel si è ottenuto il volume utile di fluido per l'accumulo (tenendo in conto i necessari spazi morti). Nella Tabella 3 vengono mostrate quindi le principali caratteristiche fisiche del serbatoio e le grandezze legate al fluido di accumulo utilizzato.

	U. M.	
Diametro interno	m	1.28
Altezza utile sale	m	2.02
Volume utile	m ³	2.60
Massa di sale	Kg	4956.1
Calore specifico medio	J/kgK	1445

Tabella 3 – Principale parametri fisici del serbatoio di accumulo del fluido (Sale ternario Hitec-XL)

Dai valori indicati si osserva che il serbatoio permette un accumulo di circa 5 tonnellate di sale che, considerando una temperatura di inizio carica nel range 190-220 °C e una escursione termica del fluido di circa 100 gradi, consente un accumulo di una quantità di energia pari a circa:

$$E_{acc} = m \int_{T_1}^{T_2} c_p dT \approx m \cdot C_{pm} \cdot \Delta T \approx 200 \text{ kWh}$$

Definite le grandezze energetiche è stata effettuata la progettazione meccanica del serbatoio e degli scambiatori da inserire in esso.

Tenendo in conto i bilanci di massa/energia, sono state definite le dimensioni dei tre scambiatori olio/sale in modo da ottenere le preventivate temperature di ingresso e uscita dei due fluidi e le potenze di scambio necessarie. Per la forma dei tre scambiatori si è optato per una configurazione con tubi avvolti a spirale a forma tronco-conica.

Per il calcolo termico si è fatto uso di un software di simulazione messo a punto per la suddetta tipologia di scambiatori. Oltre ai vincoli di tipo termo-fluidodinamico legati ai range di funzionamento e quindi alle temperature, portate, viscosità, velocità nei tubi e potenze richieste i risultati del calcolo tengono conto anche dei vincoli di forma e dimensioni in modo che gli scambiatori possano essere alloggiati agevolmente all'interno del serbatoio.

Scegliendo di usare una tubazione con diametro di circa 9.5 mm (Tubo 3/8" 18BWG 9.52x1.24) si sono dimensionate le superfici di scambio variando il numero di tubi, il numero di spire o la portata e calcolando allo stesso tempo le perdite di carico massime nei singoli tubi e la perdita di carico lato mantello.

Nel calcolo, in particolare, è stato impostato come dato iniziale il diametro esterno di tubazione e le distanze in direzione orizzontale e verticale tra le spire e i tubi. Tenendo conto della direzione del flusso di sale all'interno del mantello, si è calcolato il coefficiente di scambio globale utilizzando le classiche correlazioni presenti in letteratura (Grimison, Zukauskas) del tipo:

$$Nu = C \cdot R_{eD}^m \cdot Pr^{0.36} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_w}\right)^n$$

La correlazione, valida per diversi range di valori dei coefficienti C, m ed n, per banchi di tubi in flusso trasversale, integrata con grafici empirici può tener conto di un angolo di flusso diverso da 90° rispetto all'asse dei tubi di scambio.

Nella Figura 7 sono visibili le dimensioni critiche (diametro, distanze tra i tubi e le spire e inclinazione dei tubi) valide per tutti e tre gli scambiatori progettati.

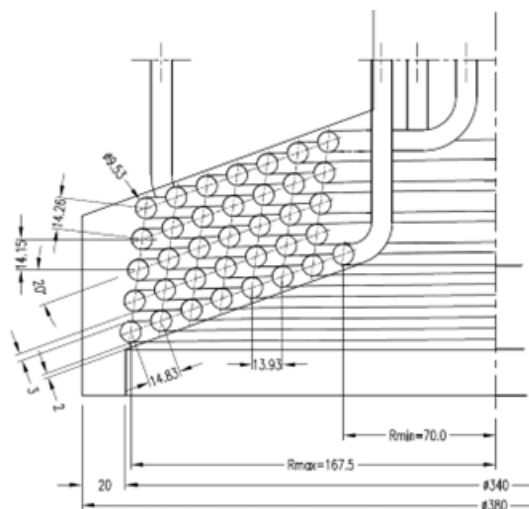


Figura 7 - Dimensioni critiche di progetto per i tre scambiatori

Avendo definito il numero di tubi e di spire per ognuno dei due scambiatori, nella Tabella 4, al variare della portata di olio, vengono mostrati i risultati che si possono ottenere mediante l'analisi parametrica:

Scambiatore di carica

Potenza calc [W]	M_olio [kg/s]	N Tubi	N Spire	ST [m]	SL [m]	Re_olio	L_tot tubo [m]	DP olio [Pa]
12926	0.1	5	7	0.01415	0.01393	80297.1	5.53	2518.7
14254.1	0.11	5	7	0.01415	0.01393	89353.9	5.53	2995.4
14909	0.12	5	7	0.01415	0.01393	97476.98	5.53	3509.4
15912.1	0.13	5	7	0.01415	0.01393	106816.3	5.53	4059.3
16908.6	0.14	5	7	0.01415	0.01393	116346.2	5.53	4645.1
17874	0.15	5	7	0.01415	0.01393	124656.6	5.53	5266.6

Scambiatore di scarica

Potenza calc [W]	M_olio [kg/s]	N Tubi	N Spire	ST [m]	SL [m]	Re_olio	L_tot tubo [m]	DP olio [Pa]
13912	0.1	7	7	0.01415	0.01393	56027.8	5.53	1365.7
15418	0.11	7	7	0.01415	0.01393	62359.85	5.53	1624.1
16199	0.12	7	7	0.01415	0.01393	68028.92	5.53	1902.8
17381.9	0.13	7	7	0.01415	0.01393	74562.16	5.53	2200.9
18562.5	0.14	7	7	0.01415	0.01393	81230.81	5.53	2518.3
19681.9	0.15	7	7	0.01415	0.01393	87033.01	5.53	2855.3

Tabella 4 - Esempio di risultati ottenibili nell'analisi parametrica degli scambiatori usando come parametro la portata di olio

Nella Figura 8 sono mostrati i disegni preliminari dello scambiatore di scarica e di carica.

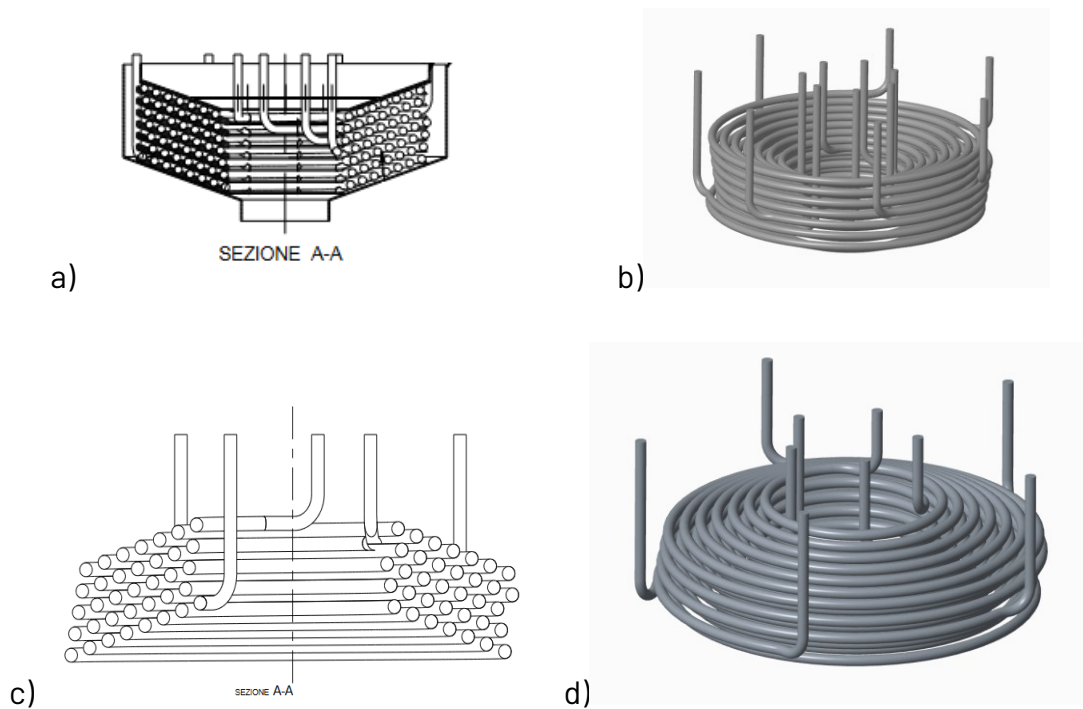


Figura 8 - Disegni preliminari dei due scambiatori: a) vista in sezione dell'interno dello shell; b) vista 3D dello scambiatore di scarica; c) vista in sezione, d) vista in 3D dello scambiatore di carica

Nella Figura 9, invece, vengono mostrati i disegni 3D del serbatoio così come si presenta nella parte esterna e nella parte interna, dove sono visibili gli scambiatori e i canali di circolazione del sale.

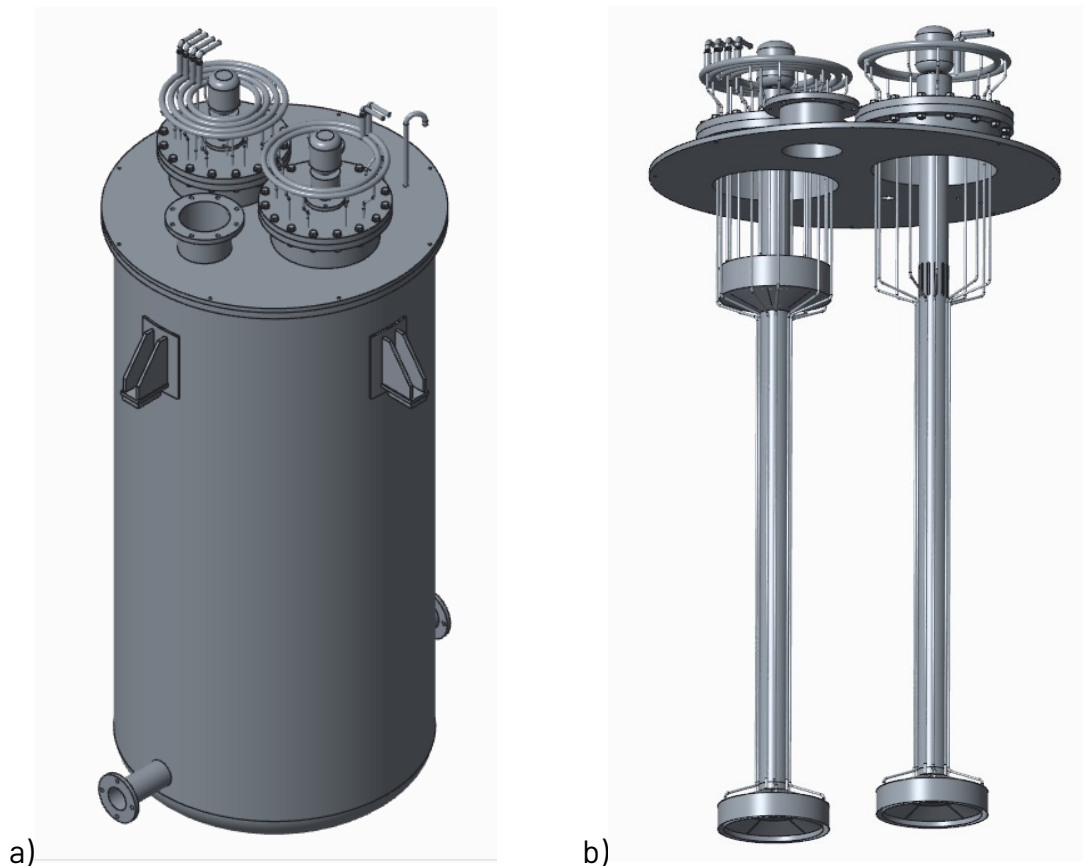


Figura 9 - Disegno 3D del serbatoio (a) vista esterna, (b) vista interna con i tre scambiatori e i relativi canali per la circolazione del sale

Infine, nella Figura 10 è mostrata una vista in sezione del serbatoio completo con i tre scambiatori e una vista dall'alto e una vista in 3D del solo coperchio.

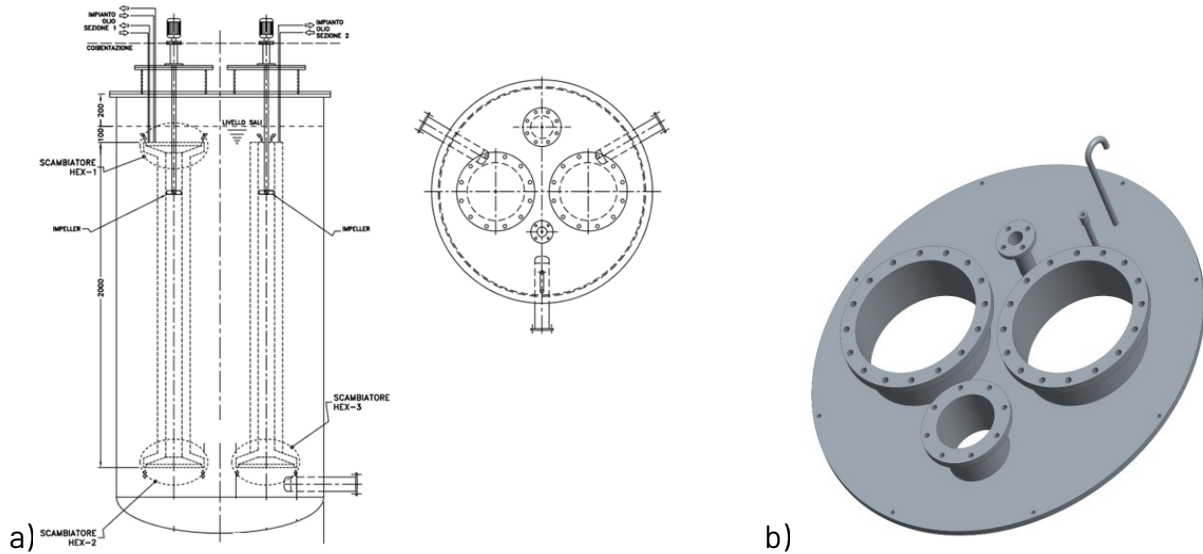


Figura 10 - a) Vista in sezione e vista dall'alto del serbatoio, b) vista 3D del coperchio

Come detto, il normale funzionamento del serbatoio sarà caratterizzato da due fasi di lavoro: fase di carica e fase di scarica. All'inizio della fase di carica, (durante la quale l'energia termica viene accumulata) il serbatoio TES si trova a una temperatura di circa 200-220 °C e, scambiando calore con l'olio proveniente dai collettori solari e/o dal riscaldatore elettrico di sezione 2, innalza la sua temperatura fino a circa 300 - 320 °C accumulando energia termica a spese del calore sensibile contenuto nell'olio. Durante la successiva fase di scarica il sale cederà la sua energia all'olio che a sua volta aumenterà la propria temperatura e potrà successivamente cedere calore ad una eventuale utenza. L'olio proveniente dalla zona denominata SEZIONE 1 scambierà la sua energia nei due scambiatori inseriti all'interno del serbatoio, HEX-1 per la scarica, posto in alto e HEX-2 per la carica, posto in basso. L'olio proveniente dal circuito della zona denominata SEZIONE 2 scambierà (in fase di carica) la sua energia con lo scambiatore HEX-3 posto sempre all'interno del serbatoio nella parte bassa. Allo scopo di regolare lo scambio di calore all'interno degli scambiatori si rende necessario controllare le portate dei due fluidi di processo, l'olio e il sale. La regolazione della portata di olio all'interno degli scambiatori sarà ottenuta regolando il numero di giri della pompa del corrispondente circuito. La portata di sale all'interno dei canali dove sono inseriti gli scambiatori viene controllata agendo su di un impeller che contribuirà, entro certi limiti, ad aumentare o a ridurre il valore che si ha per circolazione naturale innescata dalla differenza di densità tra la zona alta, più calda, e quella bassa, più fredda, del sistema termoclino.

Gli scambiatori olio/sali sono assimilabili a scambiatori a fascio tubiero realizzati con tubi avvolti a spirale di forma tronco-conica impilati uno sull'altro, con concavità rivolta verso l'alto per lo scambiatore di "scarica" HEX-1 e rivolta verso il basso per i due scambiatori di "carica" HEX-2 ed HEX-3.

Come si vede dalle figure, lo scambiatore HEX-1 è composto da 7 tubi, gli scambiatori HEX-2 e HEX-3, identici fra di loro, sono composti da 5 tubi.

Gli scambiatori sono coassiali con un tubo commerciale di diametro 3" ½ schedula 40; nel caso dell'HEX-3 il condotto nella parte alta presenta delle opportune fessure che hanno il compito di consentire al sale riscaldato di fuoriuscire nel serbatoio.

Il coperchio del serbatoio è in esecuzione imbullonato, dotato del bocchello per il carico Sali e supporta gli scambiatori che risultano ad esso collegati.

Come la restante parte del serbatoio, il coperchio sarà dotato di opportuna coibentazione per ridurre le perdite termiche.

Entrambi gli assiemi scambiatori-shell sono ancorati su due corrispondenti flange da collegare ai rispettivi bocchelli realizzati sul coperchio del serbatoio, in modo tale da consentire la rimozione degli stessi senza la necessità di rimozione del coperchio. Shell e tubazioni saranno realizzati in acciaio 316/316L.

7.3 Parte elettrica

Parallelamente alla progettazione meccanica è stata completata la progettazione della parte elettrica per l'intero impianto ibridizzato. In particolare, il nuovo quadro elettrico della SEZIONE 2A, il nuovo quadro elettrico della SEZIONE 2B, la progettazione del cablaggio di tutte le linee di alimentazione utenze circuito, dei collegamenti di terra e dei collegamenti pneumatici. Il quadro SEZIONE 2B si trova a valle del quadro SEZIONE 2A e viene alimentato da quest'ultimo. Il quadro SEZIONE 2A è alimentato direttamente a partire dalla cabina di BT.

La Figura 11 riporta la rappresentazione schematica semplificata del nuovo sistema elettrico asservito all'intero circuito solare ibrido.

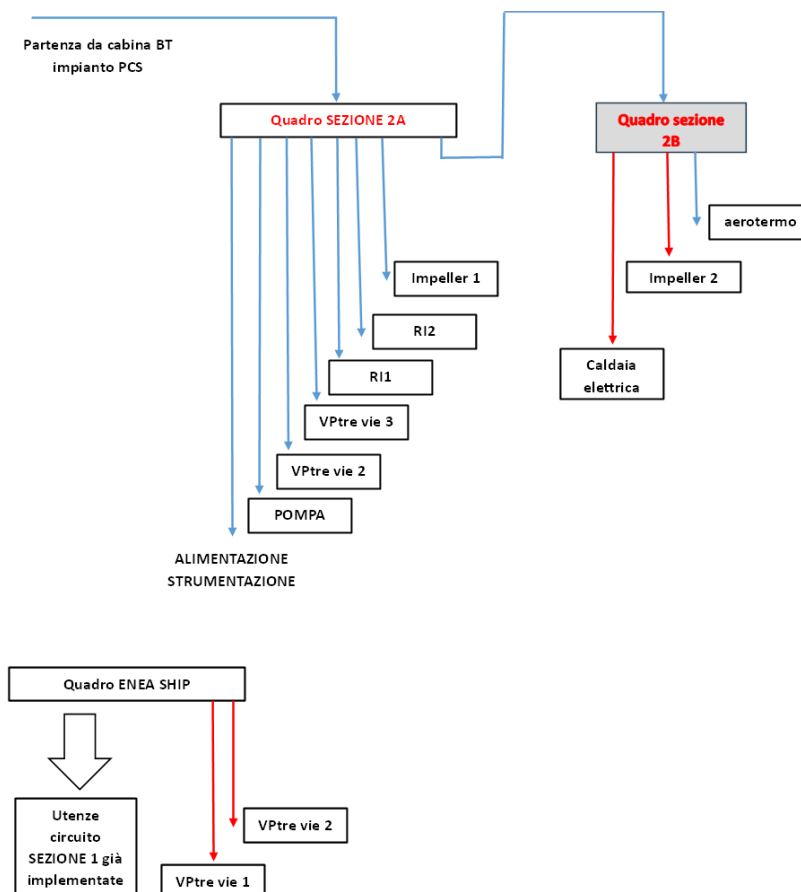


Figura 11 - Rappresentazione schematica semplificata del nuovo sistema di alimentazione elettrica per l'impianto ibrido

Il tipo di cavi previsti sono del tipo FROR 500/750 V CEI 20-20/1 e2 (p.q.a.), guaina e isolamento in PVC, non propagante incendio (CEI 20-22/2) e a contenuta emissione di gas corrosivi (CEI 20-37/2) in caso di incendio, completi di capicorda.

7.4 Parte strumentale

La realizzazione prevede che sia implementato il sistema di strumentazione e controllo a servizio del nuovo circuito della SEZIONE 2 e dei nuovi componenti/strumentazione installati sul circuito dell'impianto esistente come mostrato nello schema di processo (P&ID) di Figura 12.

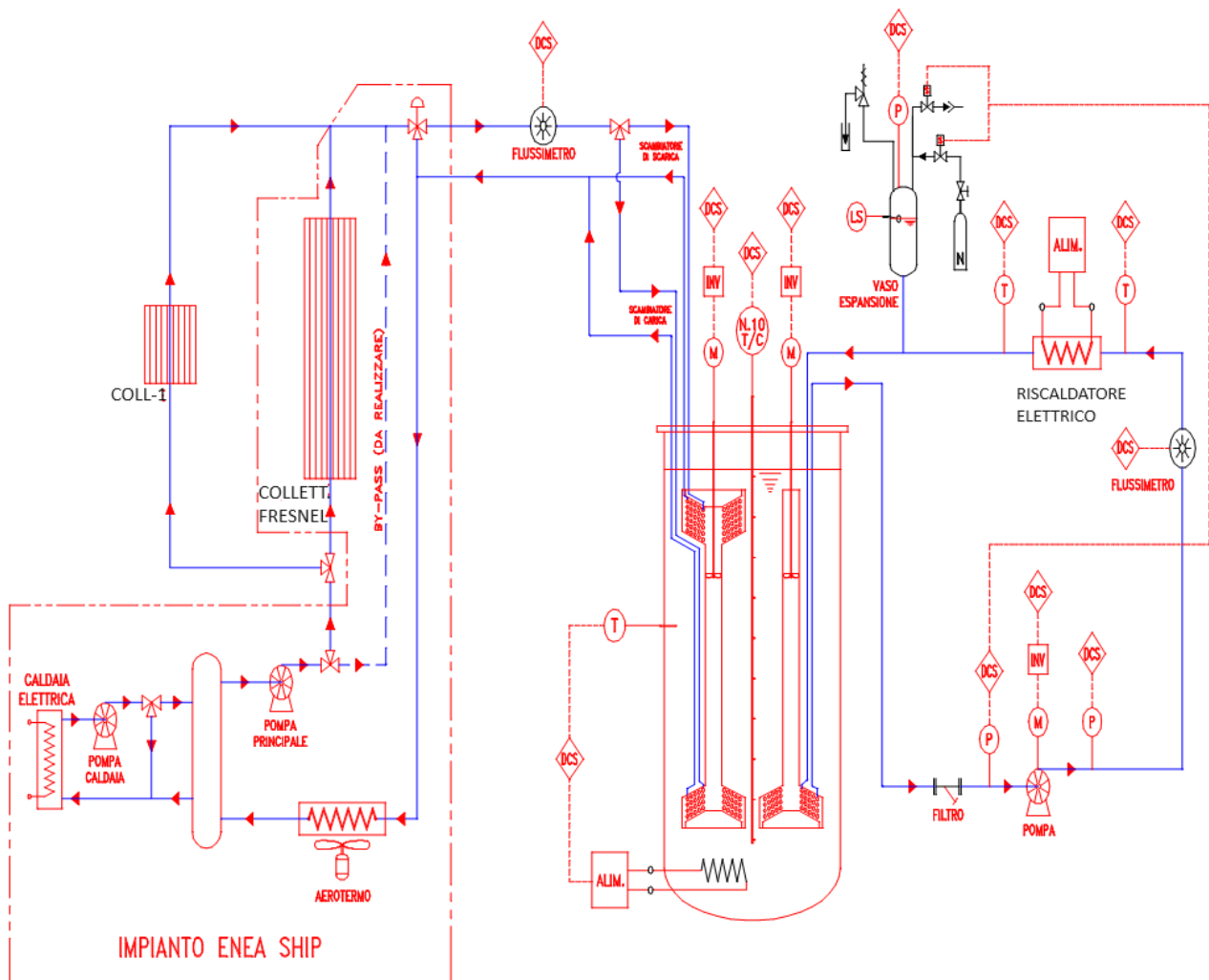


Figura 12 – Nuovo disegno P&ID impianto PTR Ibrido

Il nuovo sistema di strumentazione e controllo sarà connesso al sistema di controllo e acquisizione dati dell'intero sito sperimentale (denominato PCS) e posizionato nella stessa sala controllo.

La parte di controllo è basata su un DCS della ABB il cui software è installato su un PC mentre la parte relativa all'acquisizione dati lavora su un PC separato e registra i dati prelevandoli tramite OPC server. I due sistemi sono organizzati in modo da garantire una separazione fra le funzioni di supervisione, controllo e registrazione delle grandezze e la funzione di archiviazione delle grandezze sperimentali di interesse.

La Figura 13 seguente mostra in maniera semplificata l'architettura del sistema DCS dell'intera area sperimentale comprensiva del nuovo impianto solare PTR ibrido ENEA

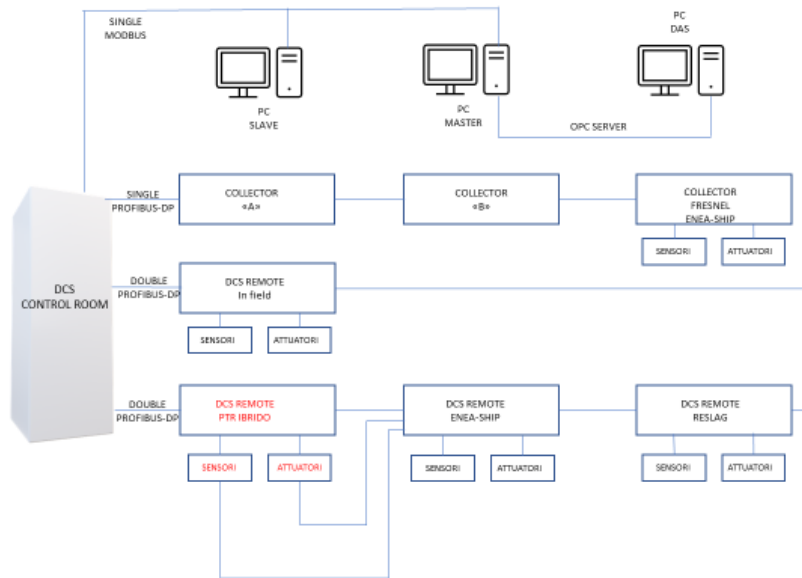


Figura 13 – Schema generale dell'architettura del sistema DCS per il nuovo impianto PTR Ibrido

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non sono state utilizzate consulenze nell'ambito della LA1.11.

9 Pubblicazioni scientifiche

Non sono state realizzate pubblicazioni scientifiche aventi per oggetto i risultati della LA1.11.

10 Eventi di disseminazione

I risultati della LA1.11 sono stati presentati nell'evento "Stati Generali del Solare Termico a Concentrazione", tenutosi a Roma il 29 Gennaio 2024.