



Ricerca di Sistema elettrico

Caratterizzazione termica del serbatoio di accumulo a sali fusi dell'Impianto sperimentale PCS del C.R. Casaccia dell'ENEA

F. Fabrizi, W. Gaggioli, L. Rinaldi, P. Tarquini

CARATTERIZZAZIONE TERMICA DEL SERBATOIO DI ACCUMULO A SALI FUSI DELL'IMPIANTO SPERIMENTALE PCS
DEL C.R. CASACCIA DELL'ENEA

F. Fabrizi , W. Gaggioli, L. Rinaldi, P. Tarquini (ENEA)

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2012

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Energia elettrica da fonte solare

Obiettivo: Sviluppo di sistemi integrati per applicazioni in impianti di piccola taglia

Responsabile del Progetto: Domenico Mazzei, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTREZZATURE SPERIMENTALI.....	6
2.1 ATTREZZATURE SPERIMENTALI GIÀ ESISTENTI.....	6
2.2 MODIFICHE NECESSARIE ALLE ATTREZZATURE SPERIMENTALI PER LA FASE SUCCESSIVA DI PROVE	10
3 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI	11
3.1 RAFFREDDAMENTO DEL SERBATOIO DI ACCUMULO	11
3.2 STRATIFICAZIONE DEI SALI FUSI.....	14
3.2.1 <i>Stratificazione dei sali fusi - Prima serie di prove sperimentali.....</i>	<i>14</i>
3.2.2 <i>Stratificazione dei sali fusi - Seconda serie di prove sperimentali.....</i>	<i>16</i>
4 CONCLUSIONI.....	25
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	25
ALLEGATO A.....	26
<i>Tavola I - Disegno della nuova linea meccanica sali fusi.....</i>	<i>27</i>
<i>Tavola II – Modifica dei morsetti della caldaia elettrica dell’Impianto PCS.....</i>	<i>28</i>
<i>Tavola III – Morsetti della caldaia elettrica dell’Impianto PCS.....</i>	<i>29</i>
<i>Tavola IV – Progetto del sistema di sfiato/rompivuoto per la nuova linea sali fusi.....</i>	<i>30</i>
<i>Tavola V a) – P&ID: particolari collegamento strumentazione e cavi scaldanti</i>	<i>31</i>
<i>Tavola V b) – P&ID: particolari collegamento strumentazione e cavi scaldanti</i>	<i>32</i>
<i>Tavola VI a) – Progetto elettrico alimentazione nuova linea sali.....</i>	<i>33</i>
<i>Tavola VI b) – Progetto elettrico alimentazione nuova linea sali.....</i>	<i>34</i>

Sommario

Nell'ambito delle applicazioni del solare termodinamico a sistemi cogenerativi di piccola e media taglia, l'ENEA ha sviluppato una tecnologia modulare denominata TREBIOS (TRigenerazione con Energie rinnovabili: BIOmasse e Solare termodinamico), che prevede una produzione di potenza, elettrica o termica, sfruttando l'energia solare ma essendo anche dotata di integrazione con biomasse e/o altre componenti rinnovabili.

Questa filiera si basa sull'utilizzo di una miscela di sali fusi sia come fluido di trasporto del calore prodotto dall'impianto solare a concentrazione, che come fluido di immagazzinamento dell'energia termica in un unico serbatoio di accumulo. Il cuore del sistema è il serbatoio di accumulo ad alta temperatura dell'energia termica raccolta dal campo solare e anche, a seconda delle esigenze, da un riscaldatore di back-up alimentato a combustibile rinnovabile (es., biomasse). In ogni caso, è l'energia termica immagazzinata nel serbatoio ad alta temperatura che viene utilizzata con continuità, anche in assenza di radiazione solare, dai processi di produzione cui il sistema è asservito (energia elettrica, termica, produzione di freddo, sistemi di condizionamento, dissalazione, ecc.).

Nella presente ricerca, per l'effettuazione delle prove sperimentali di caratterizzazione del sistema proposto si utilizza il serbatoio di accumulo termico a sali fusi già presente e disponibile nell'impianto sperimentale PCS (Prova Componenti Solari) sito nell'area Capanna del Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA, nelle vicinanze di Roma. Tale serbatoio di accumulo e le connesse attrezzature di servizio presentano le caratteristiche necessarie per la sperimentazione desiderata, ma è necessario integrarle con altre attrezzature sperimentali appositamente progettate e realizzate.

Nel presente documento vengono riportati e commentati i primi risultati derivanti dall'attività sperimentale condotta sull'attrezzatura sperimentale suddetta e vengono specificate le prove sperimentali che seguiranno per dare continuità e completezza al lavoro in corso.

1 Introduzione

Nel contesto delle energie rinnovabili, caratterizzate principalmente dalla natura incerta e volatile della sorgente di energia, uno dei requisiti più importanti che si richiedono alle varie tecnologie è la capacità di immagazzinare in maniera rapida, economica ed efficiente l'energia raccolta per distribuirla utilmente nei periodi di assenza della sorgente stessa.

Tra le diverse tecnologie di energie rinnovabili, un vantaggio evidente dell'energia solare a concentrazione (con terminologia anglosassone: Concentrating Solar Power (CSP); in italiano è denominata anche "solare termodinamico", se ad alta temperatura fino a 550°C) è la possibilità di utilizzare, in maniera relativamente economica, dei sistemi di stoccaggio per immagazzinare direttamente l'energia termica raccolta dal sole.

L'opzione generalmente preferita è un metodo mediante il quale un idoneo medium di immagazzinamento (un solido o un fluido), ben isolato dalle perdite termiche verso l'ambiente, viene mantenuto per lungo tempo alla temperatura elevata generata dall'energia solare.

I vari concetti di stoccaggio energetico termico (detti TES, acronimo dall'Inglese "Thermal Energy Storage") dipendono altamente dalla variazione giornaliera/annuale della radiazione solare e dal profilo di carico di potenza. Ogni concetto di TES si propone di raccogliere e immagazzinare l'energia solare al fine di poter traslare la sua consegna ad un secondo momento in cui serve, o per livellare la produzione dell'impianto durante la sua possibile intermittenza di funzionamento dovuta a condizioni meteorologiche (es., tempo nuvoloso). In questo modo la capacità di generazione di energia di un sistema CSP può essere esteso oltre i periodi di presenza di radiazione solare, minimizzando così anche la necessità di utilizzo di combustibili fossili o combustibili rinnovabili in caso di sistemi ibridi o di backup.

Un problema fondamentale nella progettazione di un sistema di accumulo di energia termica è la sua capacità termica: la quantità di energia che può immagazzinare e fornire successivamente. Tuttavia, la scelta del sistema adeguato dipende da molte considerazioni: - costi/benefici (costo del materiale, costi di stoccaggio del materiale, costo di scambiatori di calore, costi di spazio, costi dovuti alle perdite termiche, costi di gestione, ecc.); - caratteristiche tecniche/tecnologiche (densità di energia (per massa/volume) del materiale utilizzato; buone capacità di trasferimento del calore tra il fluido di trasferimento e il materiale di stoccaggio, stabilità meccanica e chimica del materiale di stoccaggio, completa reversibilità per un gran numero di cicli carica/scarica termica); caratteristiche di gestione (semplicità di controllo, integrazione nell'impianto di generazione di potenza, strategia operativa).

Varie sono le opzioni di TES oggi considerate in tutto il mondo. La presente proposta è una soluzione innovativa di sistema di accumulo termico per la prossima generazione di impianti solari, che intende fornire un servizio efficiente, affidabile ed economico di accumulo di energia per impianti CSP.

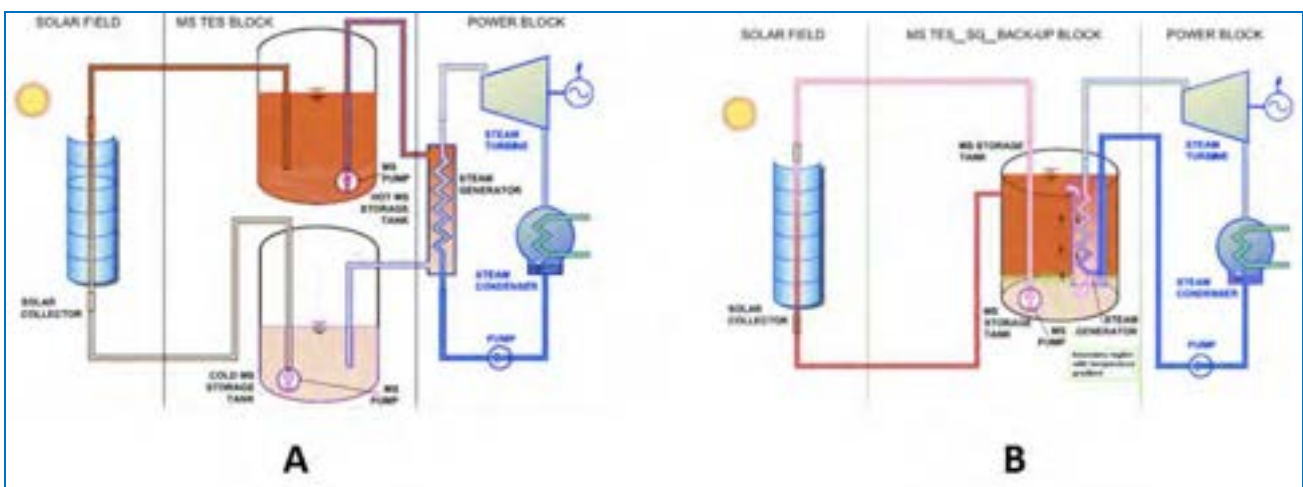


Figura 1. Due diverse possibili configurazioni di impianti solari CSP

Il sistema a due serbatoi è attualmente il più diffuso nel mondo. Nel caso della Filiera Archimede sviluppata da ENEA congiuntamente con ENEL, il fluido di immagazzinamento del calore è lo stesso fluido che scorre nel campo solare e trasporta il calore raccolto: esso è una miscela di sali di nitrato (NaNO_3 al 60%, KNO_3 al 40% in peso) ed è mantenuto a due temperature operative differenti nei due diversi serbatoi (Figura 1A).

Oltre al campo solare, i due serbatoi di stoccaggio e il Generatore di Vapore (GV) sono i due componenti principali di un impianto solare. L'integrazione di questi componenti, ottenuta inserendo un GV all'interno di un unico serbatoio, può potenzialmente portare a una notevole semplificazione dei circuiti termoidraulici (e della gestione dell'impianto) e di conseguenza ad una riduzione dei costi. Il sistema a singolo serbatoio con GV integrato riduce anche il volume di materiale di stoccaggio necessario, e il numero di componenti del generatore di vapore dai tre di uno scambiatore convenzionale "shell-and-tube" (pre-riscaldatore, evaporatore e surriscaldatore) a uno solo, eliminando completamente le tubazioni di collegamento tra i vari componenti (Figura 1B).

Tuttavia in un sistema a unico serbatoio è difficile separare il fluido caldo immagazzinato da quello freddo ma, a causa della differenza di densità in funzione della temperatura, ogni fluido stratifica naturalmente nel serbatoio disponendosi da strati più freddi in basso a strati più caldi in alto. Nel caso di utilizzo della suddetta miscela di sali fusi come mezzo di stoccaggio, si sfruttano le caratteristiche proprietà chimico-fisiche dei sali fusi stessi per favorire la stratificazione, che può essere ottenuta e mantenuta grazie al basso valore della loro conducibilità termica: infatti, a causa di questo basso valore, i sali si comportano come un isolante termico rendendo difficile la conduzione di calore da un livello dei sali all'altro. Inoltre l'effetto della trasmissione di calore per convezione tra i vari strati, che può essere indotta dalle perdite termiche verso l'ambiente, è notevolmente ridotta mediante un buon isolamento, progettato e posizionato sia esternamente che internamente (brevetto ENEA/KTI in corso di registrazione) al serbatoio, in modo che la stratificazione del fluido può essere mantenuta per molte ore. Per di più, il GV integrato funge da elemento attivo che induce e mantiene nel tempo la stratificazione dei sali.

2 Descrizione delle attrezzature sperimentali

2.1 Attrezzature sperimentali già esistenti

A fronte di queste caratteristiche desiderate, è necessario verificare la fattibilità e le capacità operative del sistema proposto attraverso un'ideale campagna sperimentale.

In tale ambito è stato sviluppato un programma sperimentale sia per la caratterizzazione preliminare del serbatoio di accumulo sia per lo studio dell'intero sistema integrato serbatoio/GV, utilizzando per lo scopo il già esistente serbatoio dell'Impianto sperimentale PCS dell'ENEA (rappresentato schematicamente in Figura 2), sito nel Centro Ricerche Casaccia presso Roma, le cui caratteristiche principali sono indicate in Tabella 1.

L'Impianto PCS è stato realizzato per provare, in condizioni reali di esercizio, i principali componenti di un impianto solare termodinamico a sali fusi ad alta temperatura (550°C).

La sua configurazione iniziale prevedeva un solo circuito in cui i sali fusi, immagazzinati nel serbatoio di stoccaggio, venivano fatti circolare dalla pompa di circolazione sali nei vari componenti di impianto e nel campo solare, dove venivano riscaldati dall'energia solare concentrata dagli specchi. Nel funzionamento dell'impianto, durante le prove sperimentali, il livello dei sali fusi nel serbatoio si abbassa di 0.7 m in quanto i sali stessi, aspirati e spinti dalla pompa, vanno a riempire i volumi vuoti delle tubazioni e dei componenti di impianto.

Nella necessità di effettuare prove sperimentali di caratterizzazione del nuovo concetto di componente integrato serbatoio/GV, è stato realizzato successivamente anche un circuito ad acqua/vapore ad alta pressione e temperatura in modo da poter alimentare convenientemente il fascio tubiero di una sezione di prova in piccola scala rappresentativa del GV, progettata e realizzata nell'ambito del Programma nazionale di ricerca EliosLAB.

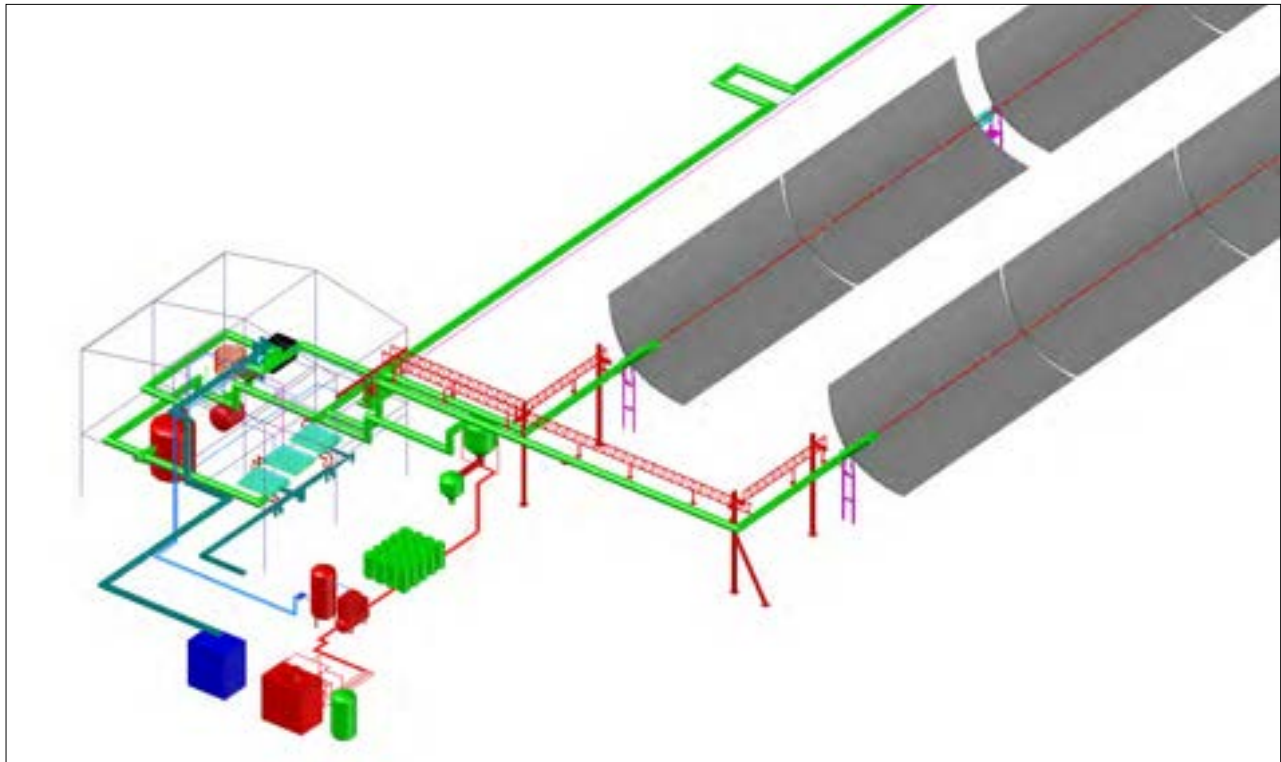


Figura 2 – Rappresentazione schematica dell’Impianto sperimentale PCS (Prova Componenti Solari)

Tabella 1 – Dati principali dell’Impianto sperimentale PCS

Descrizione	valori	u. m.
Tipo di fluido	Miscela sali: 40% KNO ₃ – 60% NaNO ₃	
Portata min / max	2,5 / 6,6	kg/s
Temperatura min / max	270 / 550	°C
Pressione mandata pompa	0,8	MPa
Serbatoio di accumulo:		
- diametro	2	m
- altezza	2,8	m
- pressione progetto	2	MPa
- potenza elettr. Riscaldatori	100	kW
- quantità di sali stoccata	~12	Mg
Potenza elettrica max caldaia	400	kW
Potenza termica max aerotermini	100	kW
Lunghezza nominale SdP	100	m
Superficie utile specchi SdP	540	m ²

Il progetto della sezione di prova da 300 kW, eseguito da ANSALDO Nucleare partner dell’ENEA nel suddetto Progetto EliosLAB, si è basato ovviamente sulle dimensioni e le caratteristiche dell’impianto e del serbatoio; tuttavia, per poter avere un’altezza del fascio tubiero e una potenza scambiata sufficientemente rappresentative dei fenomeni termofluidodinamici in studio, si è dovuta utilizzare tutta l’altezza del massimo livello dei sali fusi.

Una rappresentazione della sezione di prova GV inserita all’interno del serbatoio di accumulo sali, insieme al riscaldatore elettrico necessario al riscaldamento dei sali stessi, è riportata nella Figura 3, dove sono indicati anche i livelli massimo e minimo raggiunti dai sali nel serbatoio.

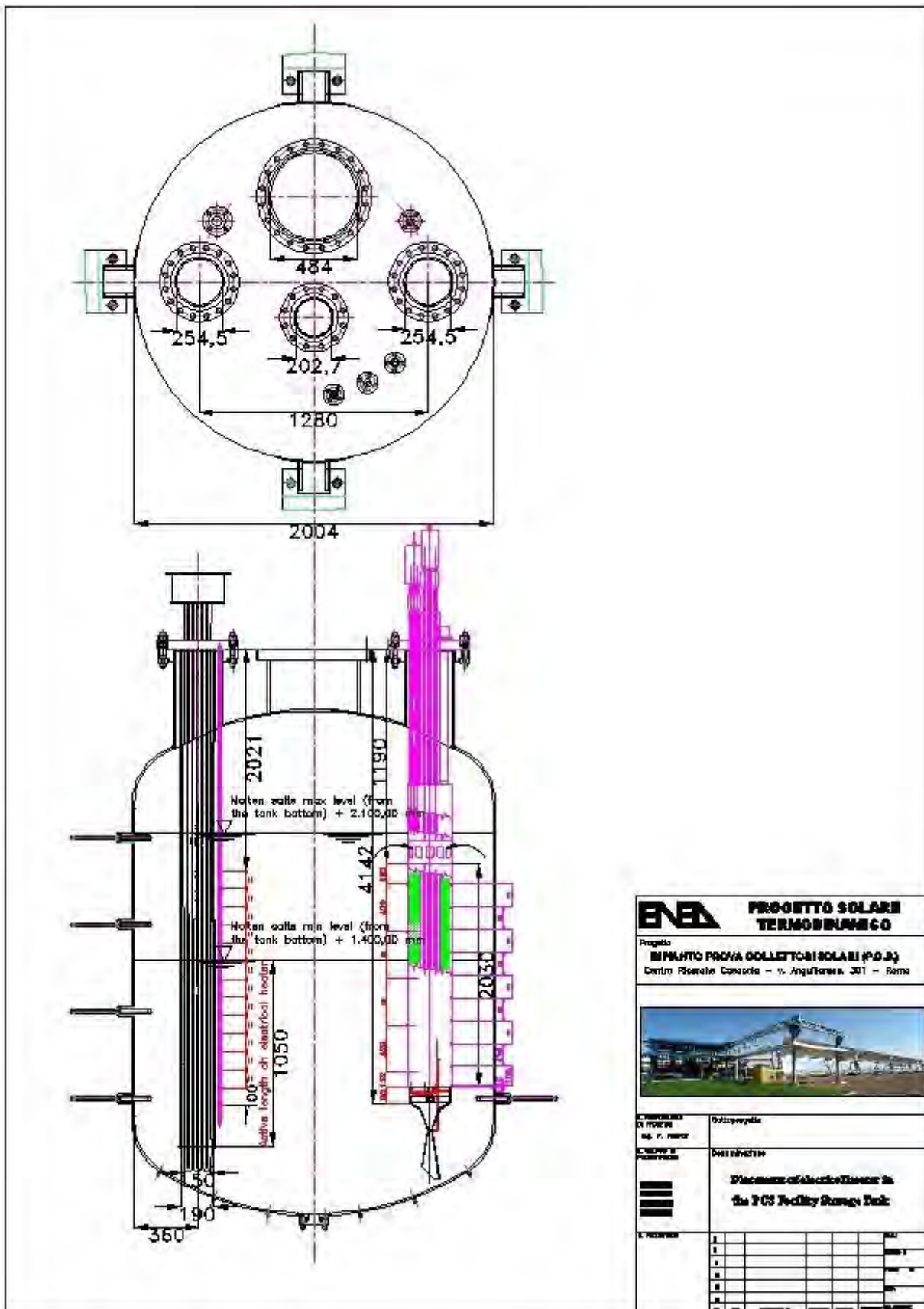


Figura 3 – Rappresentazione schematica di insieme della sezione di prova GV da 300 kW inserita nel serbatoio dell’Impianto PCS. È mostrato anche il riscaldatore elettrico dei sali fusi, visibile sulla sinistra dello schema del serbatoio

La sezione di prova, Figura 4, è uno scambiatore di calore a mantello e fascio tubiero elicoidale, a un solo passaggio sia lato sali (mantello) che lato acqua (fascio tubiero), a circolazione naturale lato sali. Le grandezze più significative che caratterizzano la sezione di prova sono riportate in Tabella 2.

Tabella 2 – Dati principali della sezione di prova GV da 300 kW

Descrizione	valori	u. m.
Potenza nominale	300	kW
Diametro esterno	0.248	m
Altezza del fascio tubiero	1.230	m
Altezza totale	2.950	m
Diametro interno dei tubi del fascio	0.0127 (1/2")	m
Passo trasversale dei tubi del fascio	0.0162	m
Passo longitudinale dei tubi del fascio	0.0180	m
Pressione/Temperatura di progetto	0.6/550	MPa/°C
Temperatura nominale sali in/out	550/290	°C
Portata nominale acqua	0.123	kg/s
Temperatura nominale ingresso acqua	240	°C
Temperatura nominale uscita vapore	520	°C

Il fascio tubiero è composto da tre tubi elicoidali concentrici inseriti in due mantelli, uno interno al fascio e uno esterno. Essi formano un condotto a sezione di corona circolare in cui scorrono i sali fluidi che entrano nel condotto dall’alto, attraverso apposite finestre realizzate sul mantello più esterno, e lo percorrono in direzione alto-basso verso il fondo nel serbatoio, uscendo dalla sezione di prova attraverso un condotto divergente dopo aver ceduto la propria energia termica al fascio tubiero.

L’acqua invece viene condotta all’ingresso dei tre tubi del fascio tubiero, che inizia nel fondo della sezione di prova, da tre tubi rettilinei incassati al centro della sezione di prova stessa (essi costituiscono il cosiddetto “downcomer”); la portata d’acqua quindi percorre in salita i tre tubi concentrici elicoidali, assorbe il calore dai sali attraverso le pareti di acciaio dei tubi del fascio, cambia di stato diventando vapore surriscaldato ed esce.

In tali condizioni, le prime prove sperimentali del sistema integrato serbatoio/GV sono state effettuate con il serbatoio pieno di sali (al suddetto livello massimo, + 2100 mm), precedentemente caricato in energia termica fino alla temperatura di prova desiderata (fino a 500°C); durante le prove i sali fluidi non sono fatti circolare nel circuito sali per non far decrescere il livello stesso all’interno del serbatoio, in quanto le finestre di ingresso sali all’interno del GV devono essere coperte dal livello per farvi entrare i sali.

Le prove sperimentali sono consistite pertanto nell’alimentare il GV con acqua preriscaldata alla prevista temperatura di ingresso nel fascio tubiero, e nella produzione di vapore surriscaldato. L’assorbimento di energia termica da parte del GV per la produzione del vapore corrisponde a una diminuzione di temperatura dei sali contenuti nel serbatoio: cioè le prove sperimentali finora effettuate sono state eseguite in condizioni di “scarico termico” del serbatoio, per un periodo di tempo sufficiente a stabilizzare il GV e a raccogliere i dati sperimentali. È da notare che durante le prove sperimentali la temperatura media dei sali contenuti nel serbatoio si abbassa data la cessione di calore all’acqua, ma le prove possono essere fatte in condizioni di stabilità in quanto il livello superiore dei sali, corrispondente alle finestre di ingresso nella sezione di prova, resta per tutta la prova al valore desiderato perché il raffreddamento e la stratificazione procedono nel tempo dal basso verso l’alto.

2.2 Modifiche necessarie alle attrezzature sperimentali per la fase successiva di prove

Ulteriori prove sperimentali, di importanza essenziale per comprendere a fondo il comportamento del GV integrato nel serbatoio, devono riguardare il funzionamento nelle condizioni di esercizio di un sistema reale e cioè con il contenuto energetico del serbatoio stazionario e costante nel tempo, vale a dire non in condizioni di “scarico termico”. Questo può avvenire, nell’Impianto PCS, solo aspirando una portata di sali dal fondo del serbatoio, portarla alla temperatura desiderata e reimmetterla quindi nella parte superiore dove sono gli strati caldi dei sali.

Per ottenere queste condizioni di prova, alcuni lavori si sono resi necessari per modificare adeguatamente l’Impianto sperimentale PCS. Si è dovuto:

- modificare il rientro dei sali caldi nel serbatoio. Infatti, originariamente il rientro dei sali avveniva nel fondo del serbatoio attraverso un condotto sagomato che penetra in alto nel fasciame esterno del serbatoio e scende sul fondo, dove rilascia i sali. Per le attuali prove, un bocchello presente nell’alto del fasciame esterno, utilizzato per misure di pressione, è stato “sacrificato” modificandolo e utilizzandolo per il rientro corretto dei sali;
- realizzare un nuovo piccolo circuito di by-pass che conduce la portata dei sali dall’uscita della caldaia elettrica, dove raggiunge la desiderata temperatura di prova, al nuovo ingresso nel serbatoio, cioè al bocchello suddetto;
- inserire valvole di intercettazione per separare il circuito sali principale dal nuovo by-pass; questo permette di svolgere le prove sperimentali impegnando un volume minimo di sali in giro per il circuito e ottenere un abbassamento sufficientemente piccolo del livello sali nel serbatoio tale da permettere agli stessi di entrare nella sezione di prova e svolgere le prove;
- realizzare il completo isolamento termico del nuovo ramo di by-pass e delle valvole;
- inserire nel nuovo ramo di by-pass sia nuovi punti di misura di pressioni e temperature che nuovi riscaldatori per mantenerlo a temperatura quanto in stand-by.

Tutti i lavori necessari sono raccolti, descritti e quantificati nel documento ENEA: “Progetto preliminare della nuova linea a sali fusi per lo studio del fenomeno della stratificazione termica nel serbatoio a sali fusi dell’Impianto PCS”, 2013.

I documenti tecnici di progetto e i disegni elaborati durante la progettazione delle suddette modifiche dell’Impianto PCS sono raccolti nell’Allegato A: “Elaborati tecnici delle modifiche all’Impianto PCS per la sperimentazione del sistema integrato serbatoio/GV”, riportato in coda al presente Documento.

3 Descrizione delle attività svolte e risultati

L’attività sperimentale prevede di raccogliere, attraverso l’esecuzione di appropriati e specifici tests sperimentali, i dati necessari alla sua completa caratterizzazione: temperature di parete del serbatoio, temperature di stratificazione dei sali fusi al suo interno, calore disperso nel tempo attraverso la coibentazione, potenza elettrica necessaria al mantenimento della temperatura, misura del livello dei sali fusi, ecc.. Una volta effettuata la validazione, i risultati sperimentali saranno poi utilizzati per il dimensionamento e la progettazione del sistema proposto.

Le prove sperimentali effettuate finora hanno riguardato principalmente:

- i transitori di raffreddamento del serbatoio;
- la stratificazione del serbatoio in condizioni di riposo e operative in fase di scarica del contenuto energetico dei sali fusi.

3.1 Raffreddamento del serbatoio di accumulo

Sono stati analizzati i transitori di raffreddamento del serbatoio di accumulo, che è riportato schematicamente in Figura 5 e i cui dati principali sono indicati in Tabella 1.

Tra le varie misure di temperatura disponibili sulle pareti del serbatoio e nella massa dei sali fusi, si prendono in esame quelle corrispondenti ad una sezione orizzontale del serbatoio posta circa alla metà del livello liquido nominale (in modo tale da minimizzare le influenze degli effetti di bordo); tali punti di misura sono posizionati uno sulla parete esterna, $T_{p,e} \cong T_{p,i}$ e gli altri due immersi nei sali fusi a 10 cm e a 30

cm dalla parete interna, rispettivamente $T_{sali,10cm}$ e $T_{sali,30cm}$

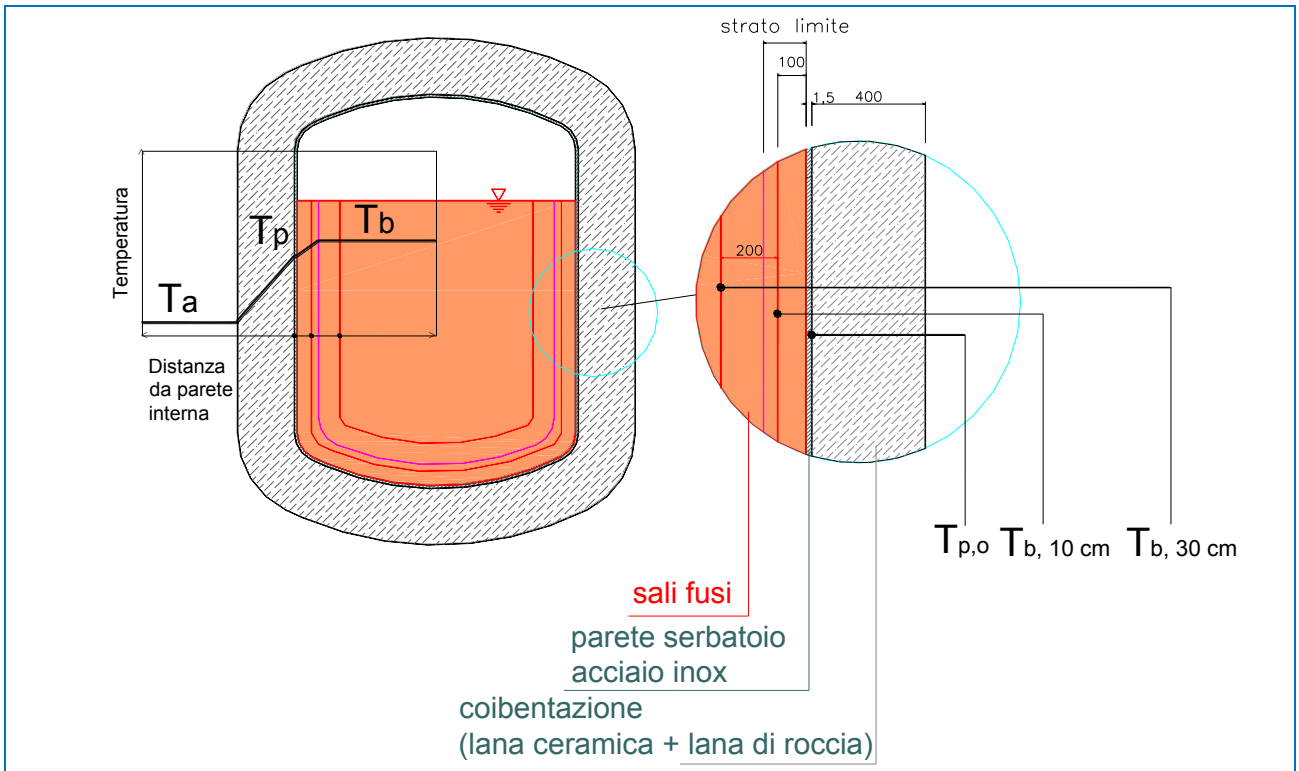


Figura 5 – Schema del serbatoio di accumulo sali fusi con indicazione delle posizioni delle misure di temperatura

I transienti in esame sono stati ottenuti lasciando raffreddare i sali accumulati da una temperatura media di 420 °C fino a 290°C (temperatura alla quale interviene il sistema di riscaldamento esterno); dalla loro analisi si evidenzia la tendenza alla stratificazione termica verticale ma soprattutto anche trasversale del fluido, come evidenziato dai profili di Figura 6, dove sono riportati i valori delle temperature nei punti di misura suddetti, con il tempo di raffreddamento come parametro. Dai valori misurati si possono ricavare utilmente il flusso locale, sulla sezione orizzontale di riferimento, con la relazione:

$$\dot{q} \cong \frac{\lambda_{sali}}{0,1} (T_{sali,10cm} - T_{p,i}) \quad (1)$$

essendo λ_{sali} la conducibilità termica dei sali fusi e 0,1 m la distanza fissa tra due punti di misura (spessore dei sali attraversato dal flusso termico). Noto il flusso termico è possibile stabilire anche il valore dello spessore dello strato limite, $s_{p,lim}$, nel quale si attua tutta la caduta di temperatura verso la parete, lasciando la parte più interna dei sali a temperatura costante, indicata come $T_{bulk} \cong T_{sali,30cm}$; infatti si può scrivere la relazione:

$$\dot{q} \cong \frac{\lambda_{sali}}{s_{p,lim}} (T_{sali,lim} - T_{p,i}) \cong \frac{\lambda_{sali}}{s_{p,lim}} (T_{sali,30cm} - T_{p,i}) \quad (2)$$

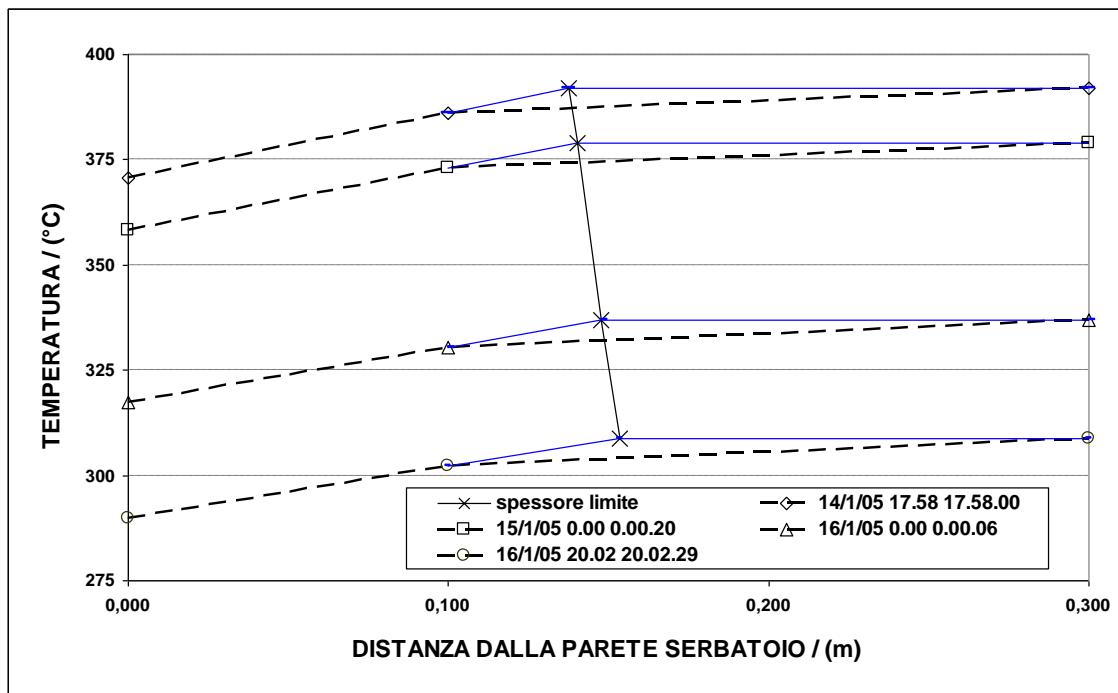


Figura 6 - Andamenti delle temperature di parete e di “bulk” con indicazione dello spessore limite

che, combinata con la (1), fornisce la seguente relazione:

$$s_{p,lim} = 0,1 \cdot \frac{(T_{sali,30cm} - T_{p,i})}{(T_{sali,10cm} - T_{p,i})} \quad (3)$$

Il valore di tale spessore limite, $s_{p,lim}$, è riportato sempre in Figura 6, dove si vede come esso aumenti al diminuire della temperatura dei sali nel serbatoio (con il passare del tempo); è prevedibile che proseguendo il transitorio, senza far intervenire i cavi scaldanti di mantello del serbatoio, lo spessore limite e la temperatura dei sali raggiungano un valore critico, per il quale inizia la formazione di uno strato congelato solido sulla parete interna, crescente con il tempo.

Tale fenomeno determina un notevole aumento della resistenza alla dispersione del calore dai sali più interni, e contrasta il loro congelamento. Per inciso, se si considerano i flussi termici trasversali associati alla stratificazione dei sali, si avrebbero dei valori di potenza dispersa dalle pareti del serbatoio circa sei volte inferiori a quelli calcolati come variazione dell’energia associata alla capacità termica dei sali nel serbatoio nel transitorio, vedi Figura 7.

Gli andamenti di Figura 7 dimostrano che le perdite termiche del serbatoio a riposo possono essere ridotte notevolmente riducendo al minimo i “ponti termici” delle apparecchiature utilizzate e che il fenomeno della stratificazioni dei sali aiuta a diminuirle. Sono in preparazione specifiche prove per analizzare il campo termico dei sali fusi all’interno del serbatoio sia in condizioni di riposo che di “agitazione”.

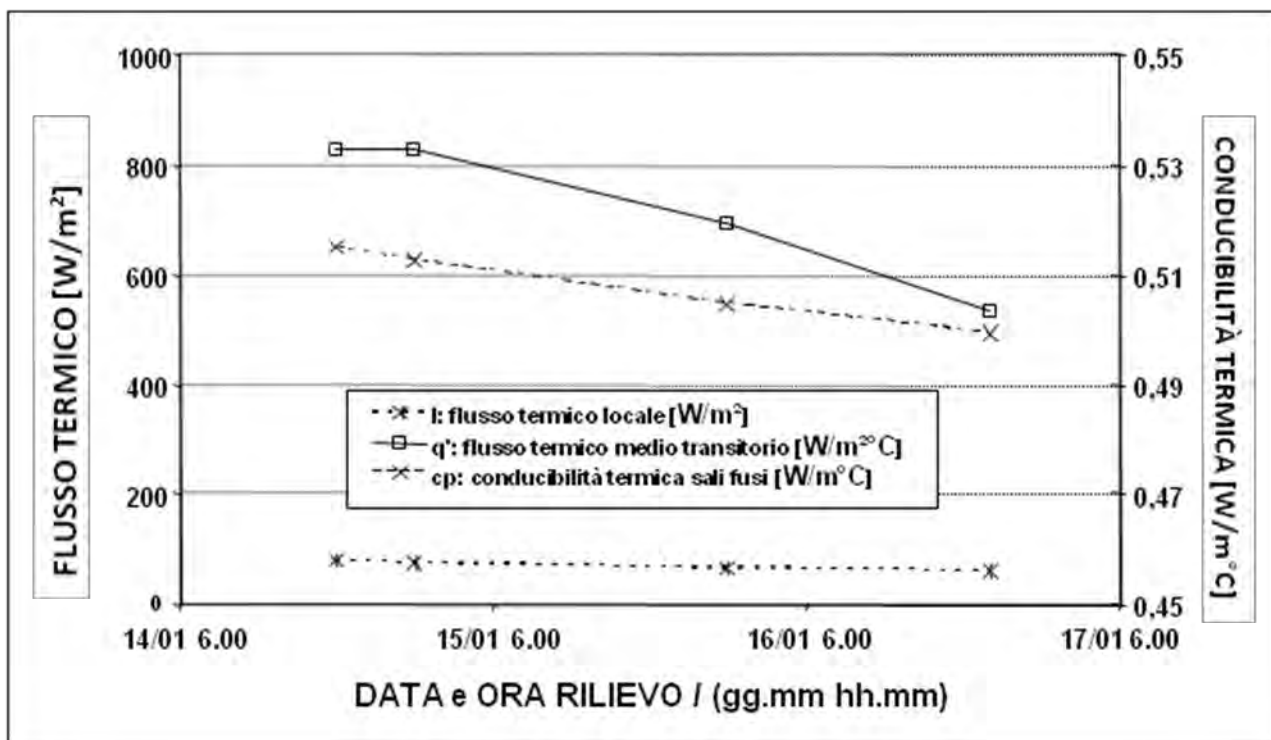


Figura 7 - Andamenti dei flussi termici locale (a metà serbatoio) e medio durante il transitorio di raffreddamento

3.2 Stratificazione dei sali fusi

Le prove sperimentali sull'innesco della stratificazione dei sali fusi contenuti nel serbatoio di accumulo sono state effettuate inizialmente in condizioni di scarica termica del contenuto energetico del serbatoio stesso. In sostanza il fluido nel serbatoio è stato portato, tramite gli appositi riscaldatori elettrici inseriti nei sali fusi, alla desiderata temperatura di prova; a quel punto, sono state effettuate due diverse serie di prove in condizioni differenti, in particolare senza (prima serie) e con l'inserimento (seconda serie) del generatore di vapore.

Quest'ultimo consiste in uno scambiatore di calore di tipo "once-through" a mantello e fascio tubiero elicoidale. La potenza scambiata in condizioni nominali (temperatura di ingresso dei sali= 550°C; temperatura di uscita dei sali= 290°C; pressione dell'acqua/vapore \leq 55 bar; temperatura di ingresso dell'acqua \leq 220°C; portata dell'acqua \leq 0.12 kg/s) è di 300 kW. Il funzionamento del GV è a circolazione naturale lato acqua che passa, spinta da una pompa di circolazione, all'interno dei tre tubi elicoidali che formano il fascio tubiero, e a circolazione naturale lato sali che invece, entrando in un passaggio con sezione a corona circolare nella parte superiore dello scambiatore, vengono a contatto con la parete più fredda dei tubi del fascio e raffreddandosi, aumentano di densità e quindi innescano la circolazione.

3.2.1 Stratificazione dei sali fusi - Prima serie di prove sperimentali

La prima serie è consistita nel lasciare che il serbatoio, una volta portato alla temperatura desiderata per la prova, si raffreddasse nel tempo a causa delle dispersioni termiche verso l'ambiente esterno, dispersioni che ovviamente esistono nonostante la coibentazione posta sulle pareti esterne del serbatoio.

Queste prove sperimentali sono servite a verificare per quanto tempo, lasciato il sistema a se stesso, si mantiene la stratificazione della miscela di sali.

Di seguito è commentata, come esempio, la prova n. 050612.

Il comportamento della miscela dei sali fusi nel tempo è mostrato nel grafico di Figura 8, dove sono riportati i risultati di una delle prove sperimentali: si può notare che la stratificazione instaurata all'inizio del test è stata mantenuta nel tempo per diverse ore (almeno 15 ore) senza che venissero a stabilirsi fenomeni di rimescolamento degli strati, anche con le perdite di calore verso l'ambiente. Questo comportamento è

dimostrato dal fatto che il raffreddamento dei vari strati avviene sì, ma con modalità uguale per tutti (cioè gli andamenti sono paralleli, tranne che per il fondo del serbatoio, dove il sale più freddo che si riscalda leggermente per effetto del calore che gli arriva dagli strati superiori. Nel grafico sono riportate le sigle delle termocoppie che misurano le temperature ai vari livelli della massa dei sali fusi, e nella Figura 9 sono approssimativamente indicate le posizioni delle stesse termocoppie di misura per poter confrontare i loro andamenti.

Si può notare che gli andamenti intermedi delle termocoppie corrispondono alle termocoppie posizionate nel cuscino d'aria sopra il livello superiore dei sali.

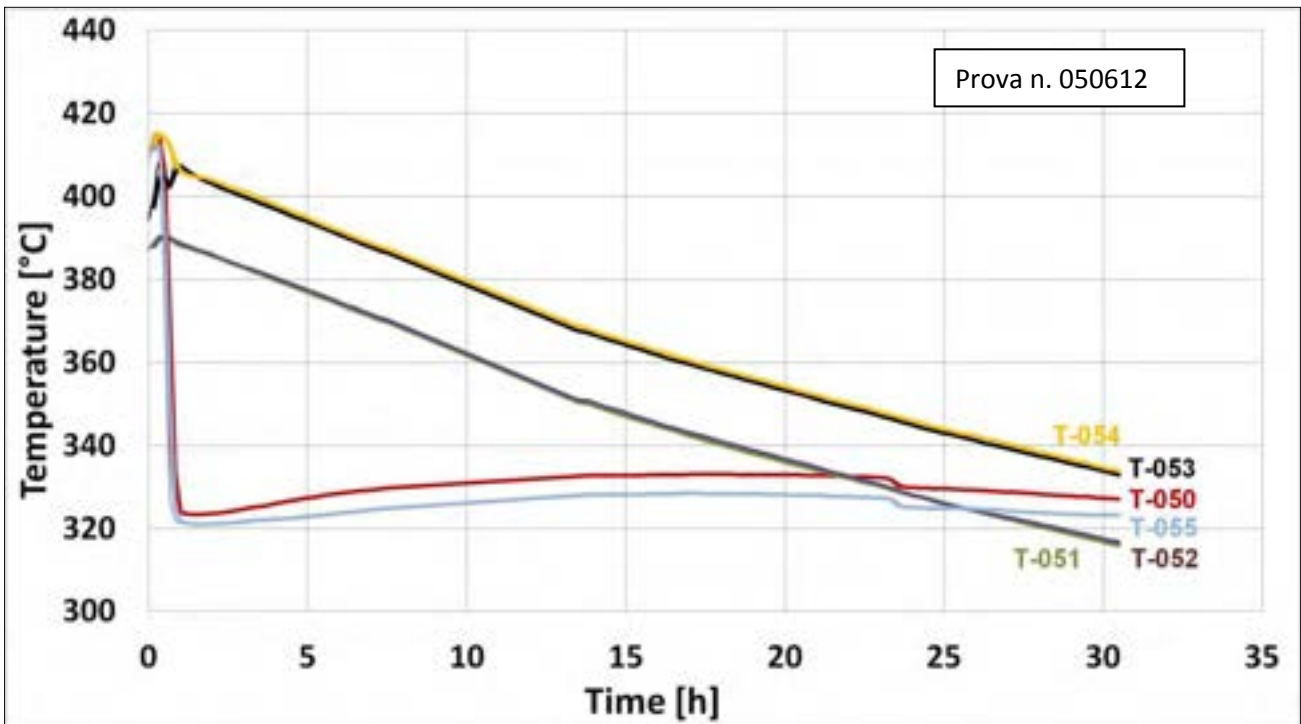


Figura 8 - Andamenti delle temperature degli strati di sali fusi in una prova di raffreddamento del serbatoio

Il fatto che il sistema in esame, costituito da un serbatoio sperimentale che presenta un elevato rapporto superficie di scambio/volume a causa delle sue limitate dimensioni ($H= 2.8$ m; $D= 2$ m), rimane sufficientemente stabile nelle sue condizioni di stratificazione dei sali contenuti, è incoraggiante per i sistemi più grandi dove i serbatoi hanno dimensioni ragguardevoli (a partire da $H= 6$ M/ $D= 12$ m fino a $H=8$ m/ $D= 30$ m) e quindi presentano un rapporto superficie di scambio/volume molto più basso.

Questo significa in sostanza che, per i sistemi più grandi rispetto a quello sperimentale esaminato, le perdite termiche verso l'ambiente esterno saranno, in maniera relativa, significativamente molto più basse e quindi anche la stratificazione dei sali fusi si manterrà per un tempo notevolmente più lungo.

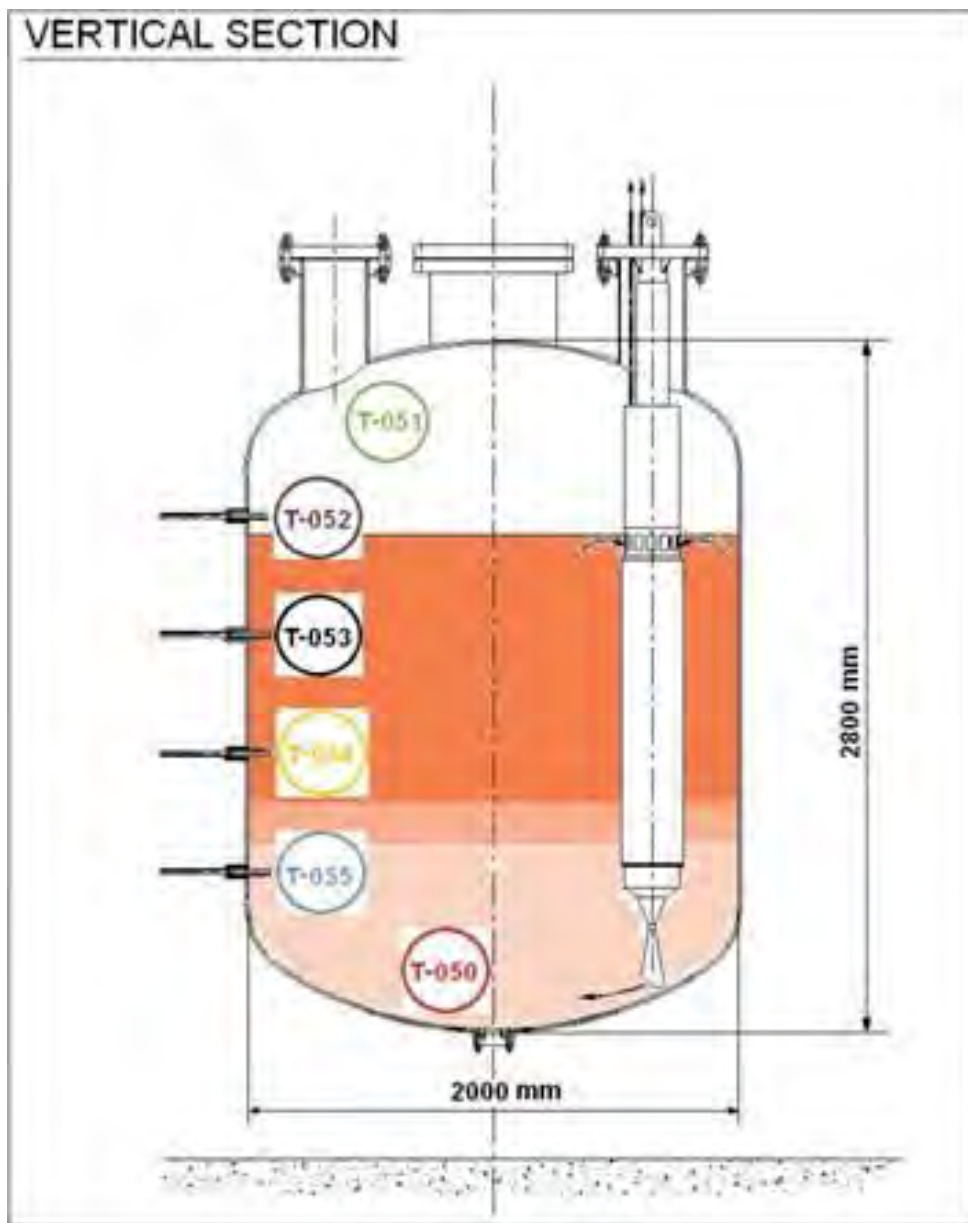


Figura 9 – Posizione delle termocoppie di misura all'interno del serbatoio

3.2.2 Stratificazione dei sali fusi - Seconda serie di prove sperimentali

Nella seconda serie di prove sperimentali si è studiato il comportamento del sistema integrato serbatoio/generatore, ma sempre in condizioni di sola scarica termica del contenuto energetico dei sali.

Una volta raggiunta la temperatura di prova, è stato avviato il generatore di vapore da 300 kW inserito nel serbatoio e immerso nei sali; esso ha iniziato a scambiare calore assorbendo energia termica dai sali per produrre vapore, e quindi raffreddando i sali stessi.

Durante le prove sono state registrate le grandezze caratterizzanti il funzionamento dell'intero sistema integrato serbatoio/generatore di vapore: portate dell'acqua, pressioni di lavoro, temperature, perdite di carico, ecc.; le grandezze misurate sono indicate nella Figura 10 che riporta schematicamente l'insieme del sistema serbatoio/generatore. In particolare sono indicate anche le 14 termocoppie, poste "a pettine" lungo un tubo immerso dall'alto nei sali, per misurare ogni 10 cm la temperatura degli strati di fluido lungo l'altezza del serbatoio.

L'elenco delle prove sperimentali sostenute, con i parametri caratterizzanti le prove stesse e i valori di prova registrati, è riportato in Tabella 3.

Measure ref. number	Measured parameter ('POS. A' of Drawing n. 2)	Z from the bottom of the tank [mm]	Meas. Unit	Test n.							
				120928/306	120928/358	120928/365	121003/38	121003/254	121029/354	121030/392	
TI.8.301	Tube 3 'skin' temperature at Z =	1820,65	[°C]	488,34	283,46	386,18	471,68	470,70	461,59	483,86	
TI.8.302	Tube 3 'limit layer' temperature at Z =	1820,65	[°C]	490,25	342,55	423,68	470,56	469,66	464,08	488,46	
TI.8.303	Tube 3 channel temperature at Z =	1829,65	[°C]	494,89	432,30	477,58	471,86	470,44	469,18	493,69	
TI.8.311	Tube 3 'skin' temperature at Z =	1694,65	[°C]	476,07	265,33	303,34	470,79	468,78	447,55	463,89	
TI.8.312	Tube 3 'limit layer' temperature at Z =	1694,65	[°C]	490,95	361,27	434,32	470,42	469,43	464,95	488,40	
TI.8.313	Tube 3 channel temperature at Z =	1703,65	[°C]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
TI.8.321	Tube 3 'skin' temperature at Z =	1568,65	[°C]	449,48	257,43	277,59	468,02	465,94	420,57	431,03	
TI.8.322	Tube 3 'limit layer' temperature at Z =	1568,65	[°C]	470,89	294,12	353,88	467,56	466,40	443,86	462,69	
TI.8.323	Tube 3 channel temperature at Z =	1577,65	[°C]	474,56	315,42	388,30	463,96	461,79	450,35	470,23	
TI.8.331	Tube 3 'skin' temperature at Z =	1442,65	[°C]	407,33	242,34	291,19	463,79	462,59	374,22	375,98	
TI.8.332	Tube 3 'limit layer' temperature at Z =	1442,65	[°C]	465,79	267,87	334,05	465,32	469,20	440,36	455,30	
TI.8.333	Tube 3 channel temperature at Z =	1451,65	[°C]	469,39	277,00	341,77	469,48	468,33	442,11	455,24	
TI.8.341	Tube 3 'skin' temperature at Z =	1316,65	[°C]	308,06	203,66	262,83	463,98	455,40	311,43	307,12	
TI.8.342	Tube 3 'limit layer' temperature at Z =	1316,65	[°C]	326,27	201,42	260,33	464,14	456,16	326,84	317,57	
TI.8.343	Tube 3 channel temperature at Z =	1325,65	[°C]	440,38	257,36	321,51	465,40	462,93	423,45	434,19	
TI.8.351	Tube 3 'skin' temperature at Z =	1190,65	[°C]	265,16	183,54	239,50	462,62	439,04	277,44	278,48	
TI.8.352	Tube 3 'limit layer' temperature at Z =	1190,65	[°C]	366,81	226,05	286,58	466,20	460,72	369,12	373,46	
TI.8.353	Tube 3 channel temperature at Z =	1199,65	[°C]	381,42	220,88	294,93	466,21	461,94	378,27	383,21	
TI.8.361	Tube 3 'skin' temperature at Z =	1064,65	[°C]	252,18	172,92	218,56	458,57	388,13	262,59	268,32	
TI.8.362	Tube 3 'limit layer' temperature at Z =	1064,65	[°C]	278,44	175,76	233,83	458,95	412,46	292,36	300,37	
TI.8.363	Tube 3 channel temperature at Z =	1073,65	[°C]	333,96	182,21	262,08	463,94	450,74	339,81	344,24	
TI.8.371	Tube 3 'skin' temperature at Z =	938,65	[°C]	247,33	171,57	202,24	449,38	277,30	255,14	262,05	
TI.8.372	Tube 3 'limit layer' temperature at Z =	938,65	[°C]	273,23	174,40	219,95	450,92	395,90	278,37	287,91	
TI.8.373	Tube 3 channel temperature at Z =	947,65	[°C]	295,34	176,54	226,11	454,82	418,76	295,56	301,65	
TI.8.381	Tube 3 'skin' temperature at Z =	812,65	[°C]	230,21	169,37	189,81	393,97	250,93	253,83	243,45	
TI.8.382	Tube 3 'limit layer' temperature at Z =	812,65	[°C]	258,26	171,12	201,28	424,48	318,30	276,39	275,65	
TI.8.383	Tube 3 channel temperature at Z =	821,65	[°C]	264,48	171,53	198,90	438,72	331,16	276,81	277,77	
TI.8.391	Tube 3 'skin' temperature at Z =	704,65	[°C]	205,49	170,35	185,41	200,30	245,78	250,77	214,08	
TI.8.392	Tube 3 'limit layer' temperature at Z =	704,65	[°C]	213,09	177,41	194,76	233,99	261,88	256,10	226,87	
TI.8.393	Tube 3 channel temperature at Z =	713,65	[°C]	254,95	170,90	204,68	397,36	320,12	277,86	281,16	

Tabella 3 – Prove sperimentali effettuate con la sezione di prova GV da 300 kW (continua)

Measure ref. number	Measured parameter ('POS. A' of Drawing n. 2)	z from the bottom of the tank (mm)	Meas. Unit	Test n.									
				121031/386	121106/398	130110/341	130110/353	130111/419	130114/332	130114/307			
TI.8.301	Tube 3 'skin' temperature at Z = 1820,65	1820,65	[°C]	469,51	441,61	472,46	474,96	385,01	385,01	385,01	385,01	285,90	
TI.8.302	Tube 3 'limit layer' temperature at Z = 1820,65	1820,65	[°C]	489,17	476,00	477,58	477,54	441,13	441,13	441,13	441,13	377,16	
TI.8.303	Tube 3 channel temperature at Z = 1829,65	1829,65	[°C]	517,94	515,04	481,56	480,09	479,74	479,74	479,74	479,74	446,67	
TI.8.311	Tube 3 'skin' temperature at Z = 1694,65	1694,65	[°C]	371,20	316,82	450,56	458,68	296,94	296,94	296,94	296,94	280,63	
TI.8.312	Tube 3 'limit layer' temperature at Z = 1694,65	1694,65	[°C]	482,17	475,47	475,96	476,13	443,12	443,12	443,12	443,12	418,92	
TI.8.313	Tube 3 channel temperature at Z = 1703,65	1703,65	[°C]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
TI.8.321	Tube 3 'skin' temperature at Z = 1568,65	1568,65	[°C]	305,95	297,49	415,16	431,16	300,70	300,70	300,70	300,70	286,51	
TI.8.322	Tube 3 'limit layer' temperature at Z = 1568,65	1568,65	[°C]	391,69	375,53	451,15	456,29	394,60	394,60	394,60	394,60	375,83	
TI.8.323	Tube 3 channel temperature at Z = 1577,65	1577,65	[°C]	437,91	433,41	463,71	460,43	448,01	448,01	448,01	448,01	429,36	
TI.8.331	Tube 3 'skin' temperature at Z = 1442,65	1442,65	[°C]	345,50	342,05	357,32	385,36	312,18	312,18	312,18	312,18	293,04	
TI.8.332	Tube 3 'limit layer' temperature at Z = 1442,65	1442,65	[°C]	354,28	344,45	438,16	449,09	392,65	392,65	392,65	392,65	384,23	
TI.8.333	Tube 3 channel temperature at Z = 1451,65	1451,65	[°C]	365,38	356,70	441,09	451,81	394,01	394,01	394,01	394,01	390,84	
TI.8.341	Tube 3 'skin' temperature at Z = 1316,65	1316,65	[°C]	305,10	306,39	297,47	298,30	294,30	294,30	294,30	294,30	281,26	
TI.8.342	Tube 3 'limit layer' temperature at Z = 1316,65	1316,65	[°C]	271,69	273,72	316,70	312,45	284,25	284,25	284,25	284,25	292,56	
TI.8.343	Tube 3 channel temperature at Z = 1325,65	1325,65	[°C]	328,27	331,26	410,50	419,55	357,75	357,75	357,75	357,75	367,53	
TI.8.351	Tube 3 'skin' temperature at Z = 1190,65	1190,65	[°C]	255,52	262,16	270,19	273,30	271,39	271,39	271,39	271,39	271,93	
TI.8.352	Tube 3 'limit layer' temperature at Z = 1190,65	1190,65	[°C]	293,38	299,63	378,59	373,82	334,10	334,10	334,10	334,10	351,34	
TI.8.353	Tube 3 channel temperature at Z = 1199,65	1199,65	[°C]	296,03	304,63	387,82	378,05	332,84	332,84	332,84	332,84	348,40	
TI.8.361	Tube 3 'skin' temperature at Z = 1064,65	1064,65	[°C]	243,36	255,43	267,26	263,08	262,63	262,63	262,63	262,63	266,53	
TI.8.362	Tube 3 'limit layer' temperature at Z = 1064,65	1064,65	[°C]	253,93	268,89	313,65	300,42	284,46	284,46	284,46	284,46	296,60	
TI.8.363	Tube 3 channel temperature at Z = 1073,65	1073,65	[°C]	283,86	286,59	351,76	348,34	317,51	317,51	317,51	317,51	326,44	
TI.8.371	Tube 3 'skin' temperature at Z = 938,65	938,65	[°C]	226,81	241,95	259,45	259,88	241,97	241,97	241,97	241,97	253,40	
TI.8.372	Tube 3 'limit layer' temperature at Z = 938,65	938,65	[°C]	241,96	254,90	282,86	293,28	273,36	273,36	273,36	273,36	276,01	
TI.8.373	Tube 3 channel temperature at Z = 947,65	947,65	[°C]	251,09	272,39	325,07	312,94	282,08	282,08	282,08	282,08	285,88	
TI.8.381	Tube 3 'skin' temperature at Z = 812,65	812,65	[°C]	211,89	227,81	257,84	258,43	222,41	222,41	222,41	222,41	241,39	
TI.8.382	Tube 3 'limit layer' temperature at Z = 812,65	812,65	[°C]	228,00	248,45	289,47	290,79	257,31	257,31	257,31	257,31	274,48	
TI.8.383	Tube 3 channel temperature at Z = 821,65	821,65	[°C]	229,68	248,57	280,07	281,93	253,63	253,63	253,63	253,63	264,30	
TI.8.391	Tube 3 'skin' temperature at Z = 704,65	704,65	[°C]	203,69	215,91	235,31	242,96	202,76	202,76	202,76	202,76	227,04	
TI.8.392	Tube 3 'limit layer' temperature at Z = 704,65	704,65	[°C]	209,66	222,02	247,37	252,76	214,91	214,91	214,91	214,91	236,60	
TI.8.393	Tube 3 channel temperature at Z = 713,65	713,65	[°C]	238,60	251,54	299,11	291,22	265,11	265,11	265,11	265,11	276,79	

Tabella 3 – Prove sperimentali effettuate con la sezione di prova GV da 300 kW (continua)

Measure ref. number	Measured parameter ('POS. B' of Drawing 2)	z from the bottom of the tank [mm]	Meas. Unit	Test n.							
				120928/ 306	120928/ 358	120928/ 365	121003/ 38	121003/ 254	121029/ 354	121030/ 392	
TI.8.410	Temperature on the outer wall of the internal blanket at Z =	1818,3	[°C]	493,78	441,17	474,68	471,54	469,84	466,42	490,63	
TI.8.411	Temperature on the inner wall of the external blanket at Z =	1818,3	[°C]	496,67	486,91	492,37	472,14	470,30	469,78	495,14	
TI.8.420	"	1558,3	[°C]	480,91	324,78	379,30	470,59	468,61	455,52	476,70	
TI.8.421	"	1558,3	[°C]	494,14	459,45	476,42	470,77	468,76	466,81	491,75	
TI.8.430	"	1298,3	[°C]	406,06	281,22	303,54	469,47	461,15	347,28	320,67	
TI.8.431	"	1298,3	[°C]	485,20	458,01	466,73	469,37	466,40	436,60	464,70	
TI.8.440	"	1038,3	[°C]	337,49	277,99	295,40	465,16	441,50	333,83	342,86	
TI.8.441	"	1038,3	[°C]	478,21	423,13	458,34	465,59	461,02	382,53	405,67	
TI.8.450	"	778,3	[°C]	289,62	240,87	271,33	403,29	348,65	283,78	290,57	
TI.8.451	"	778,3	[°C]	450,35	371,77	409,76	442,77	442,73	327,69	336,02	
TI.8.111	Temperature of molten salts mixture at tube bundle inlet	1973	[°C]	499,68	493,73	496,84	475,33	473,58	473,30	498,68	
TI.8.110	Temperature of molten salts mixture at tube bundle outlet	456	[°C]	271,01	252,15	258,17	359,61	323,39	281,58	286,58	
FI.8.110	Pressure drop on the molten salts Venturi tube	-	mH ₂ O	-18,333	9,886	-12,975	-6,40	-5,91	-1,182	44,90	
TI.8.200	Inlet water temperature at the inlet manifold	-	[°C]	149,55	150,64	156,19	127,03	213,33	226,28	168,47	
TI.8.201	Inlet water temperature of the outer helical tube	'Pos. c' Draw. 2	[°C]	195,62	165,84	181,30	168,32	232,43	240,77	176,88	
TI.8.202	Inlet water temperature of the central helical tube	'Pos. c' Draw. 2	[°C]	185,33	162,58	173,49	169,95	232,72	240,96	181,27	
TI.8.203	Inlet water temperature of the inner helical tube	'Pos. c' Draw. 2	[°C]	218,03	186,08	207,42	170,58	232,39	244,16	200,46	
TI.8.211	Outlet water temperature of the outer helical tube	-	[°C]	495,78	461,09	482,50	461,35	470,11	469,41	494,39	
TI.8.212	Outlet water temperature of the central helical tube	-	[°C]	487,40	247,08	405,24	454,27	466,02	461,10	483,48	
TI.8.213	Outlet water temperature of the inner helical tube	-	[°C]	495,28	414,43	476,03	458,56	468,77	468,95	493,87	
PI.8.200	Inlet water pressure (pressure gauge) at the inlet manifold	-	MPa	33,87	36,89	40,38	7,70	29,46	39,82	43,72	
PI.8.210	Outlet water pressure (pressure gauge) at the outlet manifold	-	MPa	30,60	35,78	36,52	3,77	25,37	35,44	39,22	

Tabella 3 – Prove sperimentali effettuate con la sezione di prova GV da 300 kW (continua)

Measure ref. number	Measured parameter ('POS. B' of Drawing 2)	z from the bottom of the tank (mm)	Meas. Unit	Test n.									
				120928/ 306	120928/ 358	120928/ 365	121003/ 38	121003/ 254	121029/ 354	121030/ 392			
	Measured parameter ('POS. B' of Drawing 2)												
TI.8.410	temperature on the outer wall of the internal blanket at Z =	1818,3	[°C]	513,31	507,83	477,82	472,06	471,85	471,85	471,85	471,85	466,81	
TI.8.411	temperature on the inner wall of the external blanket at Z =	1818,3	[°C]	530,24	531,69	483,02	480,17	496,30	496,30	496,30	496,30	474,12	
TI.8.420	"	1558,3	[°C]	441,13	423,03	456,88	444,88	401,54	401,54	401,54	401,54	438,99	
TI.8.421	"	1558,3	[°C]	518,31	516,83	478,78	474,39	482,34	482,34	482,34	482,34	468,19	
TI.8.430	"	1298,3	[°C]	304,12	307,36	350,10	333,86	310,96	310,96	310,96	310,96	355,27	
TI.8.431	"	1298,3	[°C]	508,53	508,74	466,64	460,22	470,17	470,17	470,17	470,17	457,22	
TI.8.440	"	1038,3	[°C]	307,96	313,74	354,29	347,16	325,23	325,23	325,23	325,23	326,96	
TI.8.441	"	1038,3	[°C]	481,61	494,50	452,36	425,95	419,63	419,63	419,63	419,63	407,05	
TI.8.450	"	778,3	[°C]	272,87	277,89	302,35	297,12	285,74	285,74	285,74	285,74	283,73	
TI.8.451	"	778,3	[°C]	416,16	437,45	432,73	388,46	353,49	353,49	353,49	353,49	360,96	
TI.8.111	Temperature of molten salts mixture at tube bundle inlet	1973	[°C]	533,76	535,84	486,47	484,27	502,56	502,56	502,56	502,56	477,17	
TI.8.110	Temperature of molten salts mixture at tube bundle outlet	456	[°C]	257,53	263,39	293,84	293,76	279,14	279,14	279,14	279,14	277,51	
FI.8.110	Pressure drop on the molten salts Venturi tube	-	mH ₂ O	-28,42	-56,42	37,88	49,43	25,59	25,59	25,59	25,59	43,24	
TI.8.200	Inlet water temperature at the inlet manifold	-	[°C]	169,15	185,69	194,94	198,60	175,56	175,56	175,56	175,56	209,15	
TI.8.201	Inlet water temperature of the outer helical tube	'Pos. c' Draw. 2	[°C]	182,38	196,70	200,43	202,80	182,84	182,84	182,84	182,84	216,56	
TI.8.202	Inlet water temperature of the central helical tube	'Pos. c' Draw. 2	[°C]	186,87	199,58	204,47	209,58	183,51	183,51	183,51	183,51	212,68	
TI.8.203	Inlet water temperature of the inner helical tube	'Pos. c' Draw. 2	[°C]	206,40	215,93	216,91	217,58	197,39	197,39	197,39	197,39	231,65	
TI.8.211	Outlet water temperature of the outer helical tube	-	[°C]	519,88	517,91	482,59	478,45	483,02	483,02	483,02	483,02	466,29	
TI.8.212	Outlet water temperature of the central helical tube	-	[°C]	477,55	451,46	471,53	472,91	385,08	385,08	385,08	385,08	262,30	
TI.8.213	Outlet water temperature of the inner helical tube	-	[°C]	514,71	512,69	482,69	480,34	490,22	490,22	490,22	490,22	464,92	
PI.8.200	inlet water pressure (pressure gauge) at the inlet manifold	-	MPa	41,17	43,24	42,84	45,38	57,44	57,44	57,44	57,44	63,83	
PI.8.210	inlet water pressure (pressure gauge) at the outlet manifold	-	MPa	38,64	39,80	34,15	35,25	41,90	41,90	41,90	41,90	30,68	

Tabella 3 – Prove sperimentali effettuate con la sezione di prova GV da 300 kW (continua)

Measure ref. number	Measured parameter	Z from the bottom of the tank [mm]	Meas. Unit	120928/306		120928/358		120928/365		121003/38		121003/254		121029/354		121030/392	
				Initial value	Final value	Initial value	Final value	Initial value	Final value	Initial value	Final value	Initial value	Final value	Initial value	Final value	Initial value	Final value
ΔPI.8.221	Water-side pressure drop of the outer helical tube	-	MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ΔPI.8.222	Water-side pressure drop of the central helical tube	-	MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ΔPI.8.223	Water-side pressure drop of the inner helical tube	-	MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FI.8.201	Water flowrate at the inlet of the outer helical tube	-	kg/s	0,03862	0,02931	0,03910	0,01233	0,04431	0,04271	0,04271	0,04271	0,04271	0,04271	0,04271	0,04271	0,04271	0,02909
FI.8.202	Water flowrate at the inlet of the central helical tube	-	kg/s	0,02550	0,03535	0,02885	0,00861	0,02029	0,02752	0,02752	0,02752	0,02752	0,02752	0,02752	0,02752	0,02752	0,04520
FI.8.203	Water flowrate at the inlet of the inner helical tube	-	kg/s	0,02567	0,02770	0,02596	0,00788	0,01763	0,03216	0,03216	0,03216	0,03216	0,03216	0,03216	0,03216	0,03216	0,03565
FI.7.003	Total water flowrate at the temperature TI.7.013	-	l/h	280,05	300,76	300,77	93,20	244,62	299,32	299,32	299,32	244,62	299,32	299,32	299,32	348,58	
TI.1.050	Temperature of molten salts bulk inside the tank at Z =	635,9	[°C]	463,54	376,66	424,34	441,18	452,92	330,15	441,18	452,92	452,92	330,15	441,18	452,92	334,38	
TI.1.051	Temperature of air in the tank dome at Z =	2375,9	[°C]	497,11	491,45	494,72	472,72	471,55	466,39	472,72	471,55	471,55	466,39	472,72	471,55	493,53	
TI.1.052	Temperature of molten salts bulk inside the tank at Z =	2075,9	[°C]	496,85	489,38	492,92	469,89	468,81	460,06	469,89	468,81	468,81	460,06	469,89	468,81	489,00	
TI.1.053	"	1595,9	[°C]	497,97	493,23	495,64	471,58	469,60	470,93	471,58	469,60	469,60	470,93	471,58	469,60	496,39	
TI.1.054	"	1115,9	[°C]	498,82	483,82	493,35	469,27	468,09	425,71	469,27	468,09	468,09	425,71	469,27	468,09	458,70	
TI.1.055	"	635,9	[°C]	453,62	356,82	410,82	432,72	446,15	324,49	432,72	446,15	446,15	324,49	432,72	446,15	326,58	
	Measured parameter ('POS. D' of Drawing 2)			Initial value	Final value	Initial value	Final value	Initial value	Final value	Initial value	Final value	Initial value	Final value	Initial value	Final value	Initial value	Final value
TI.8.501	Stratification temperature of the molten salts bulk at Z =	1893,1	[°C]	493,76	492,86	489,58	489,10	492,26	490,48	469,46	470,06	467,35	468,86	469,88	466,88	490,60	489,78
TI.8.502	"	1793,1	[°C]	501,48	500,38	496,59	495,99	499,47	497,49	475,17	475,60	472,89	473,97	475,07	471,56	499,70	498,65
TI.8.503	"	1693,1	[°C]	500,75	499,40	495,69	494,89	498,35	496,69	473,49	474,27	471,26	472,46	474,69	470,89	499,17	497,90
TI.8.504	"	1593,1	[°C]	500,58	499,25	495,19	494,59	498,57	496,69	472,97	473,57	470,66	471,99	474,77	468,48	499,17	497,59
TI.8.505	"	1493,1	[°C]	500,88	499,85	494,96	493,39	498,95	496,69	472,59	473,37	470,66	471,56	475,17	457,28	499,25	496,69
TI.8.506	"	1393,1	[°C]	500,88	499,47	492,78	490,98	498,65	495,49	471,99	472,46	470,36	471,09	473,67	441,77	497,67	485,29
TI.8.507	"	1293,1	[°C]	500,58	499,25	490,48	488,98	498,20	493,61	471,99	472,59	470,36	471,86	465,40	422,08	488,88	468,25
TI.8.508	"	1193,1	[°C]	500,88	499,25	486,77	483,39	497,49	491,51	470,36	470,79	469,16	469,76	450,09	398,28	471,79	444,68
TI.8.509	"	1093,1	[°C]	500,68	498,20	472,97	467,95	494,96	482,36	469,08	469,28	468,48	468,86	431,55	372,47	449,26	415,56
TI.8.510	"	993,1	[°C]	499,85	493,46	454,88	449,09	485,29	465,70	466,45	466,45	466,75	466,88	410,38	348,09	421,10	380,49
TI.8.511	"	893,1	[°C]	492,86	480,68	431,47	423,96	468,78	444,60	460,06	458,56	464,35	462,47	383,67	330,75	384,47	350,77
TI.8.512	"	793,1	[°C]	479,35	463,19	399,48	388,48	448,49	419,30	449,19	446,56	459,69	454,27	356,56	320,08	354,78	328,50
TI.8.513	"	693,1	[°C]	461,99	443,58	355,88	342,75	426,96	382,59	434,68	430,35	451,07	442,37	335,76	310,98	331,58	315,97
TI.8.514	"	593,1	[°C]	448,89	425,89	312,19	303,67	397,17	333,76	414,59	405,57	440,47	429,47	325,39	303,97	317,07	307,78

Tabella 3 – Prove sperimentali effettuate con la sezione di prova GV da 300 kW (continua)

Measure ref. number	Measured parameter	z from the bottom of the tank [mm]	Meas. Unit	Test n.													
				120928/ 306	120928/ 358	120928/ 365	121003/ 38	121003/ 254	121029/ 354	121030/ 392							
Δ P1.8.221	Water-side pressure drop of the outer helical tube	-	MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
Δ P1.8.222	Water-side pressure drop of the central helical tube	-	MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
Δ P1.8.223	Water-side pressure drop of the inner helical tube	-	MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
FI.8.201	Water flowrate at the inlet of the outer helical tube	-	kg/s	0.03894	0.02670	0.03539	0.03839	0.03591	0.03611	0.03007	0.03007	0.03007	0.03007				
FI.8.202	Water flowrate at the inlet of the central helical tube	-	kg/s	0.02890	0.04569	0.04398	0.03732	0.05592	0.06365	0.07098	0.07098	0.07098	0.07098				
FI.8.203	Water flowrate at the inlet of the inner helical tube	-	kg/s	0.02685	0.04191	0.03802	0.04131	0.03459	0.03135	0.02837	0.02837	0.02837	0.02837				
FI.7.003	Total water flowrate at the temperature TI.7.013	-	l/h	289.38	354.98	363.22	360.58	403.63	403.63	395.92	395.92	395.92	395.92				
TI.1.050	Temperature of molten salts bulk inside the tank at Z =	635.9	[°C]	419.91	447.43	452.51	390.56	356.59	356.59	353.89	353.89	353.89	353.89				
TI.1.051	Temperature of air in the tank dome at Z =	2375.9	[°C]	531.64	534.26	433.61	479.87	490.09	498.09	472.36	472.36	472.36	472.36				
TI.1.052	Temperature of molten salts bulk inside the tank at Z =	2075.9	[°C]	530.86	533.85	411.47	476.94	494.96	494.96	465.86	465.86	465.86	465.86				
TI.1.053	"	1595.9	[°C]	532.41	534.80	484.33	482.18	500.32	500.32	475.34	475.34	475.34	475.34				
TI.1.054	"	1115.9	[°C]	527.98	532.36	433.23	476.87	479.84	479.84	463.66	463.66	463.66	463.66				
TI.1.055	"	635.9	[°C]	404.80	432.07	444.26	374.58	346.60	346.60	340.85	340.85	340.85	340.85				
	Measured parameter ('PO5, D' of Drawing 2)			Initial value	Final value	Initial value	Final value	Initial value	Final value	Initial value	Final value	Initial value	Final value				
TI.8.501	Stratification temperature of the molten salts bulk at Z =	1893.1	[°C]	519.37	517.79	527.31	526.48	484.59	484.29	482.96	481.88	501.18	499.40	501.18	499.40	475.67	475.17
TI.8.502	"	1793.1	[°C]	536.38	534.15	530.36	537.38	487.47	487.00	485.49	484.39	504.59	502.78	504.59	502.78	478.08	477.40
TI.8.503	"	1693.1	[°C]	535.58	533.25	537.46	536.48	486.47	485.97	484.59	483.69	503.88	501.95	503.88	501.95	478.38	477.48
TI.8.504	"	1593.1	[°C]	535.58	533.17	537.28	536.38	486.39	485.97	484.59	483.26	503.68	501.88	503.68	501.88	477.48	475.60
TI.8.505	"	1493.1	[°C]	535.65	533.17	537.76	536.56	486.77	486.17	484.59	482.96	503.88	500.75	503.88	500.75	475.37	471.79
TI.8.506	"	1393.1	[°C]	535.65	532.27	537.08	535.78	486.17	485.79	483.49	481.28	503.28	496.89	503.28	496.89	468.86	459.89
TI.8.507	"	1293.1	[°C]	534.88	529.69	536.38	534.08	485.07	484.59	481.99	478.60	500.75	486.77	500.75	486.77	454.20	443.10
TI.8.508	"	1193.1	[°C]	532.88	524.78	534.88	532.27	484.69	483.69	480.18	474.39	493.01	466.45	493.01	466.45	435.46	422.60
TI.8.509	"	1093.1	[°C]	526.41	511.10	531.67	526.86	483.69	482.96	475.77	463.07	475.17	442.07	475.17	442.07	413.16	394.59
TI.8.510	"	993.1	[°C]	511.48	488.67	522.50	512.98	481.58	479.88	464.50	445.05	451.59	412.08	451.59	412.08	380.29	355.08
TI.8.511	"	893.1	[°C]	486.77	455.78	503.16	488.07	475.97	471.09	445.78	418.47	422.78	376.68	422.78	376.68	341.85	325.26
TI.8.512	"	793.1	[°C]	453.47	417.49	472.46	453.00	463.77	455.58	420.20	383.57	389.28	347.39	389.28	347.39	316.17	304.87
TI.8.513	"	693.1	[°C]	416.89	380.66	436.89	415.19	445.20	433.88	386.37	340.20	356.18	327.29	356.18	327.29	278.66	275.65
TI.8.514	"	593.1	[°C]	382.39	342.38	397.85	377.96	420.57	406.77	341.10	313.68	333.88	306.80	333.88	306.80	247.70	246.87

Tabella 3 – Prove sperimentali effettuate con la sezione di prova GV da 300 kW

Non si riportano gli andamenti ottenuti per tutte le prove; a titolo esemplificativo, la Figura 11 mostra, per la prova n. 121029/3544 di scarico termico effettuata a partire da una temperatura iniziale dei sali a 500°C, l'andamento delle temperature dei diversi strati dei sali, misurate dalle 14 termocoppie. È riportata anche la misura della portata dell'acqua nei tubi del GV, con la sigla FI_7003 da leggere sul secondo asse Y. Ogni punto sperimentale è acquisito dal sistema di acquisizione dati ogni 5 secondi.

Si vede che, quando il GV comincia a funzionare e a scambiare calore con i sali fusi (circa a 0,5 h dall'inizio della prova), la massa dei sali fusi contenuti nel serbatoio comincia a raffreddarsi poiché i sali escono freddi dal GV nel fondo del serbatoio.

Poiché il sistema è chiuso, cioè è in condizioni di "scarico termico" del serbatoio in quanto i sali, non riciclando all'esterno, non vengono reintrodotti riscaldati nella zona calda più elevata del serbatoio, l'intero sistema tende a raffreddarsi mantenendo una stratificazione in cui la zona di transizione caldo/freddo aumenta di altezza nel corso del tempo in quanto il GV continua a operare sottraendo calore dal sistema. A circa 3 h dall'inizio della prova la pompa dell'acqua si arresta, il riscaldatore elettrico all'interno del serbatoio comincia a funzionare e le temperature dei diversi strati di sali ricominciano a salire e tendono a raggiungere il valore precedente, che sarà poi raggiunto durante la notte.

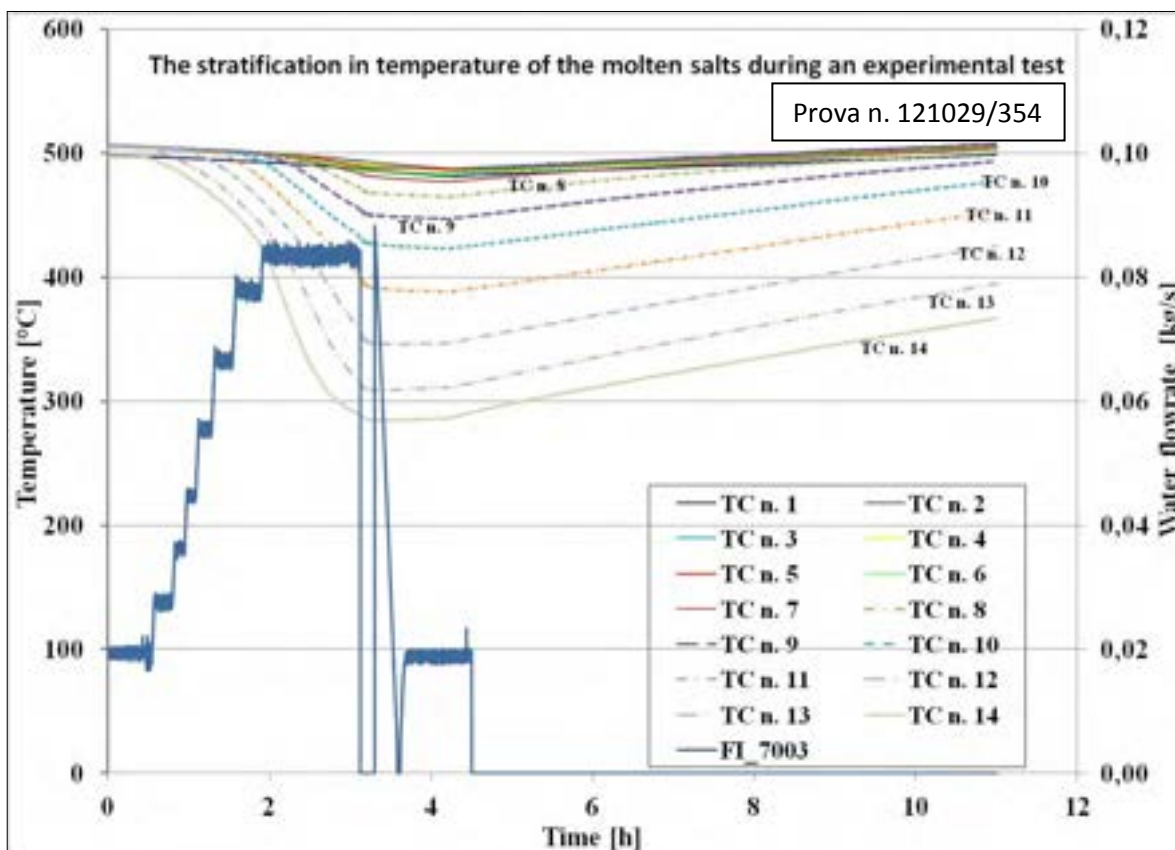


Figura 11 – Andamento delle temperature di stratificazione dei sali fusi durante una prova sperimentale

Questi due esempi (Figure 8 e 11) danno un'idea della possibilità di creare una stratificazione nei sali fusi stoccati nel serbatoio, e anche (Figura 11) che un GV introdotto all'interno del serbatoio si comporta come un elemento attivo che migliora questo fenomeno.

La zona di transizione caldo/freddo è denominata zona "termoclina"; le sue caratteristiche peculiari durante il funzionamento del serbatoio e il suo comportamento (altezza, spostamento verso l'alto e verso il basso durante le fasi rispettivamente di scarico e ricarica dell'energia termica, ecc.) saranno valutate successivamente mediante le ulteriori prove sperimentali che già sono previste e che saranno effettuate sfruttando le modifiche di impianto che sono state descritte in precedenza (vedi par. 2.2).

Con queste ulteriori prove sperimentali si vuole in particolare studiare anche:

- il comportamento del GV in condizioni reali di esercizio, in
 - o condizioni stazionarie;
 - o condizioni transitorie;
- le perdite di calore del serbatoio durante l'esercizio;
- la stratificazione dei sali fusi nel serbatoio, in
 - o condizioni stazionarie;
 - o condizioni transitorie.

4 Conclusioni

L'attività sperimentale finora svolta dall'ENEA ha portato a una prima caratterizzazione quali-quantitativa delle caratteristiche termoidrauliche e del comportamento operativo del sistema proposto di nuova concezione, consistente in un serbatoio di accumulo integrato con un generatore di vapore di tipo "once-through".

Le prove sperimentali, che sono state effettuate sull'impianto PCS del C.R. Casaccia dell'ENEA, consentono di affermare che le ipotesi alla base del nuovo sistema integrato proposto:

- possibilità di configurare una centrale solare a concentrazione con un unico serbatoio invece dei due della concezione classica;
 - possibilità della creazione e del mantenimento nell'unico serbatoio di una stratificazione dei sali;
 - possibilità di integrazione del sistema con un generatore di vapore immerso di tipo "once-through" a circolazione naturale lato sali;
 - possibilità di ottenere vapore surriscaldato nelle quantità/qualità desiderate,
- possono essere considerate fattibili, realistiche e meritevoli di ulteriori approfondimenti. Per lo svolgimento dei predetti approfondimenti è stato modificato l'impianto PCS secondo le modifiche riportate nell'allegato "A".

La possibilità di realizzare sistemi di accumulo/generazione di vapore simili al sistema proposto permetterebbe di ottenere una serie di vantaggi, quali: - compattezza delle soluzioni tecnologiche; - modularità dei sistemi; - semplicità di gestione operativa; - efficienza nelle prestazioni; - costi contenuti.

Queste potenziali caratteristiche di notevole importanza per la riduzione dei costi di investimento e gestione dei sistemi di accumulo e generazione di vapore di impianti solari ad alta temperatura, dovranno essere verificate ulteriormente dalle prove sperimentali in corso e non ancora concluse, e con una nuova campagna sperimentale già prevista.

5 Abbreviazioni ed acronimi

TREBIOS:	TRigenerazione con Energie rinnovabili: BIOmasse e Solare termodinamico
PCS:	Prova Componenti Solari
CSP:	Concentrating Solar Power
TES:	Thermal Energy Storage
GV:	Generatore di Vapore

ALLEGATO A

Elaborati tecnici delle modifiche all'Impianto PCS
per la sperimentazione del sistema integrato serbatoio/GV

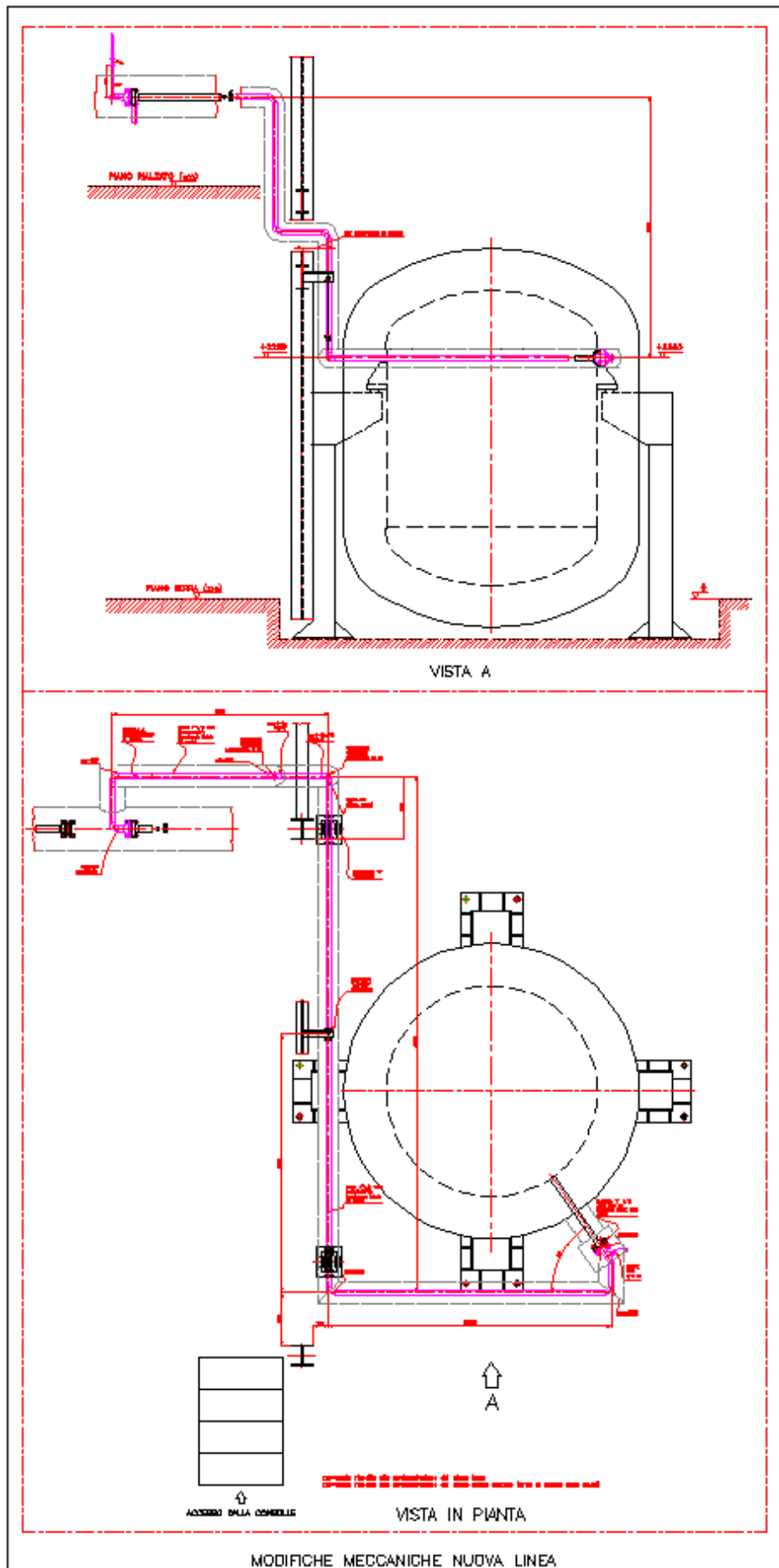


Tavola I - Disegno della nuova linea meccanica sali fusi

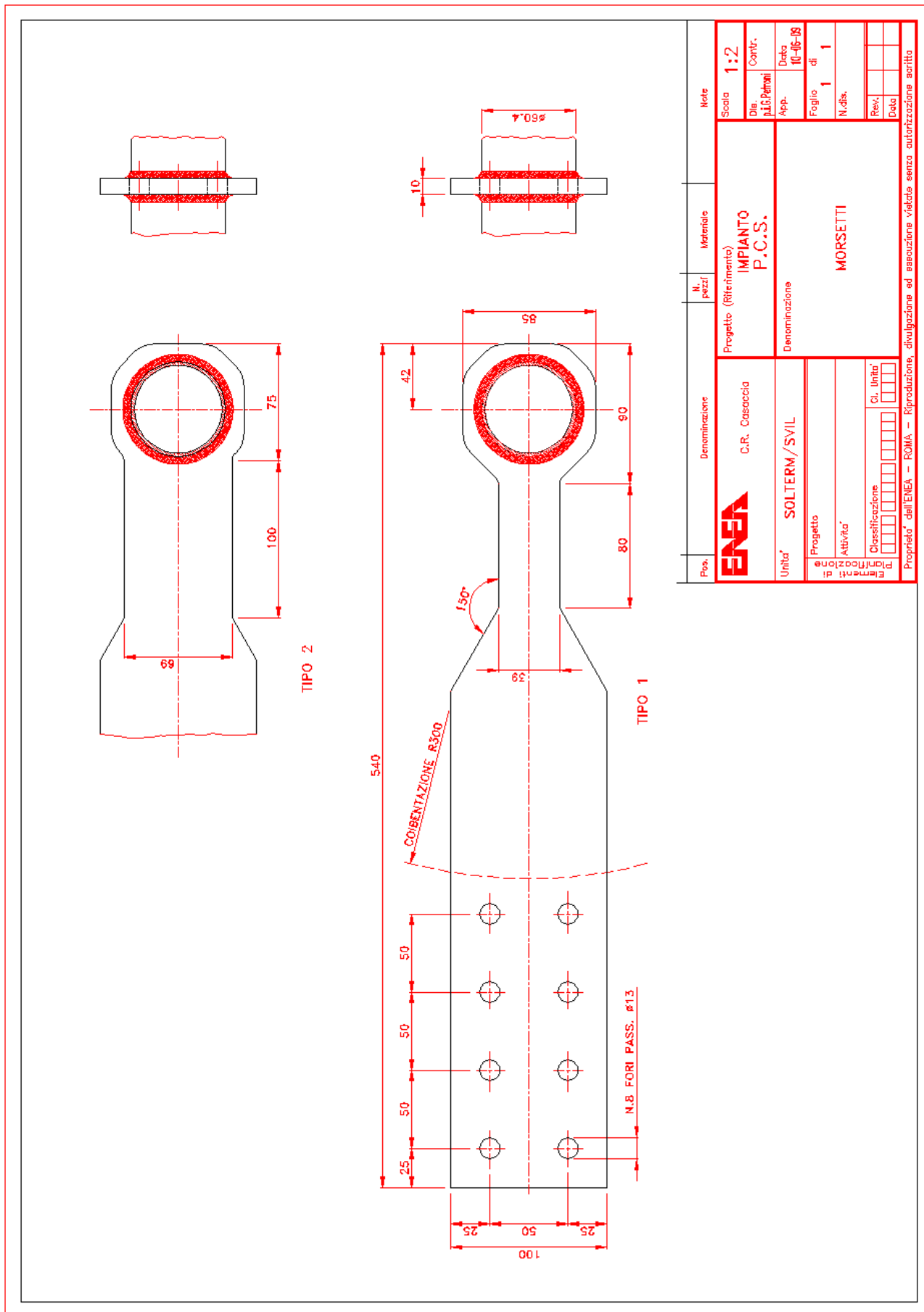


Tavola III – Morsetti della caldaia elettrica dell’Impianto PCS

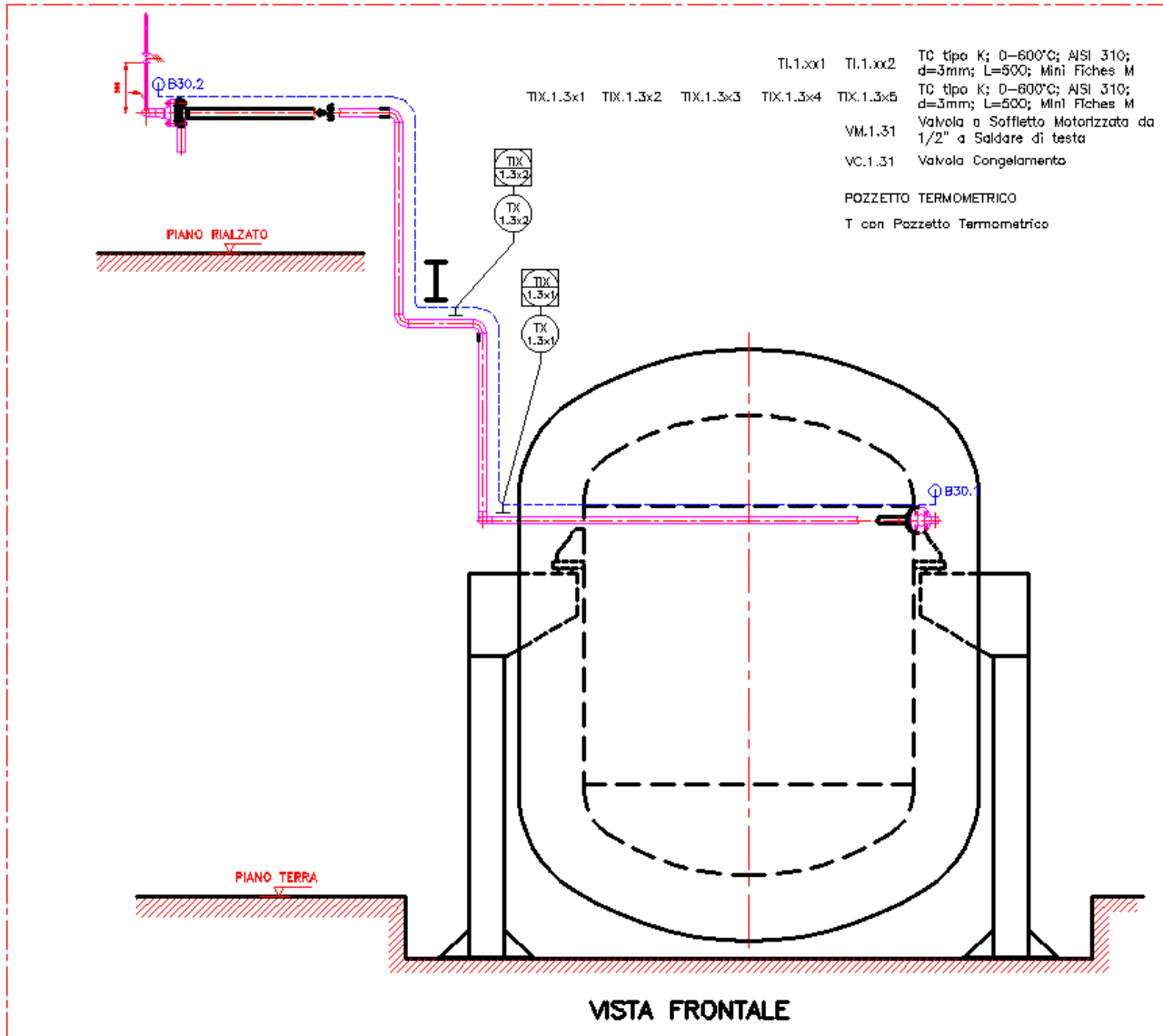
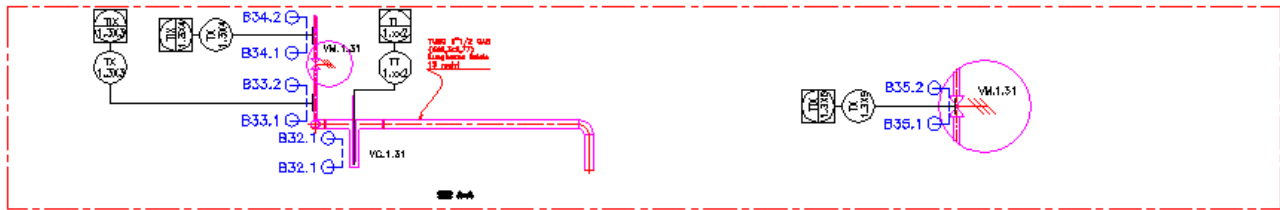


Tavola V a) – P&ID: particolari collegamento strumentazione e cavi scaldanti

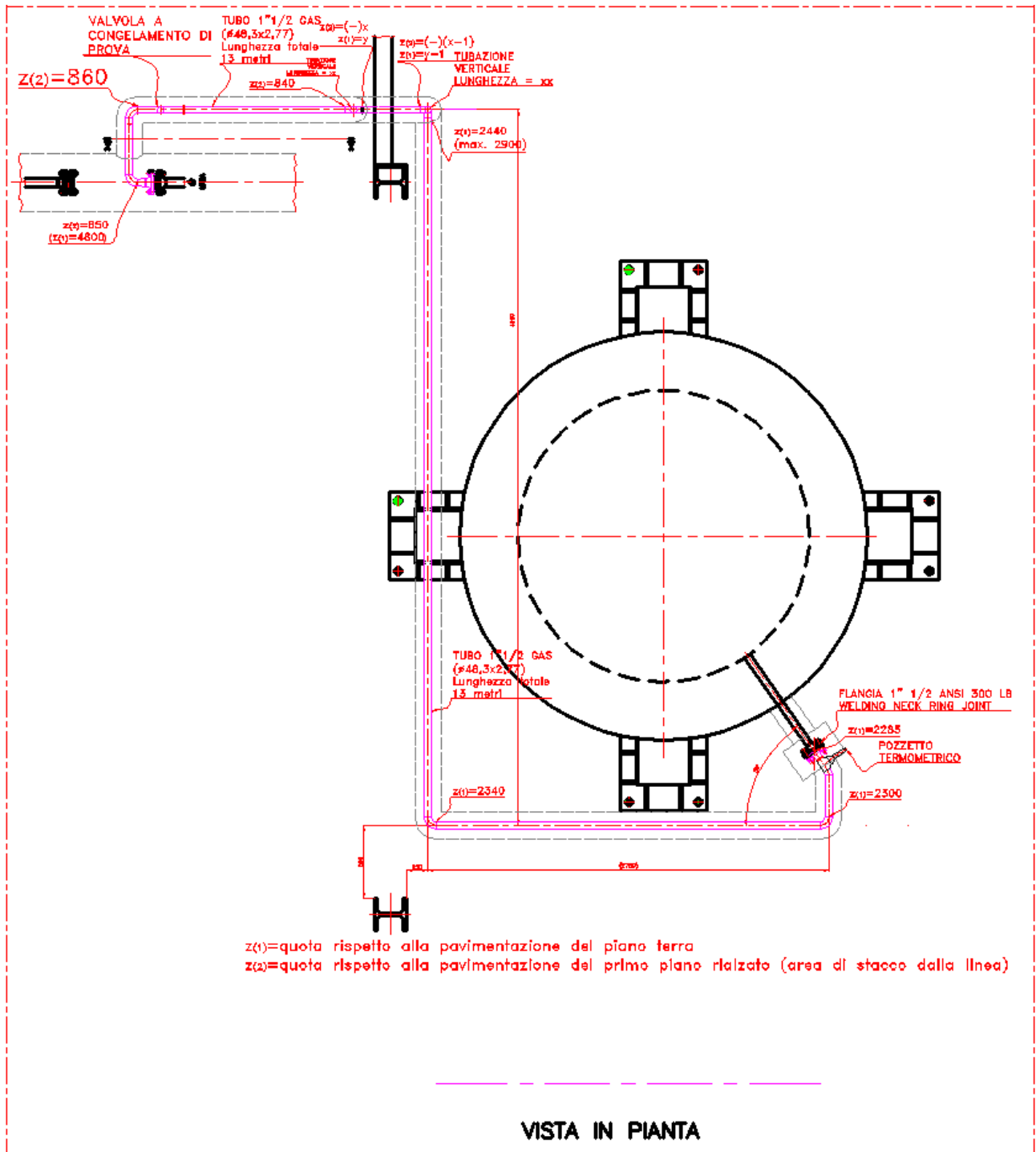


Tavola V b) – P&ID: particolari collegamento strumentazione e cavi scaldanti

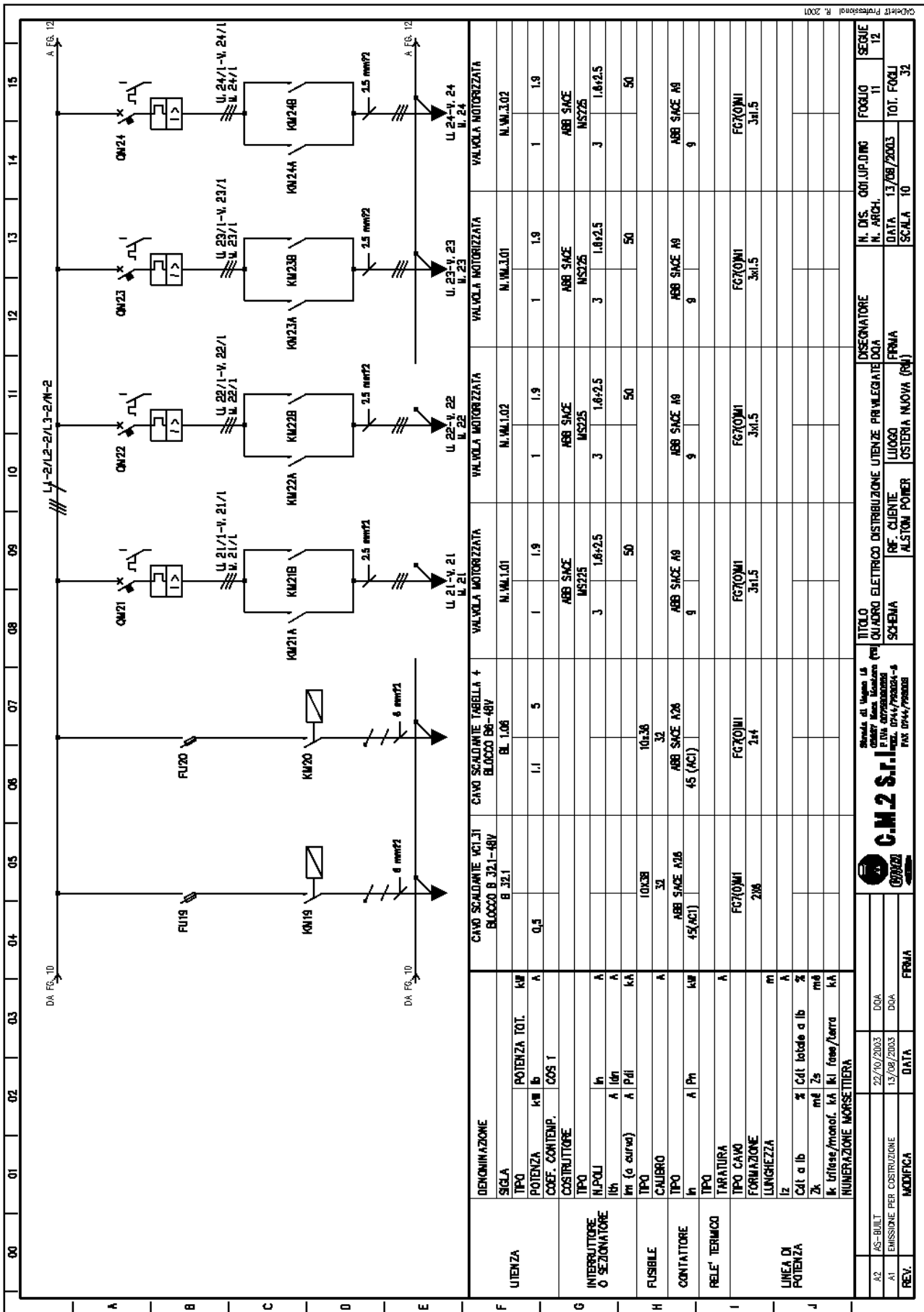


Tavola VI a) – Progetto elettrico alimentazione nuova linea sali

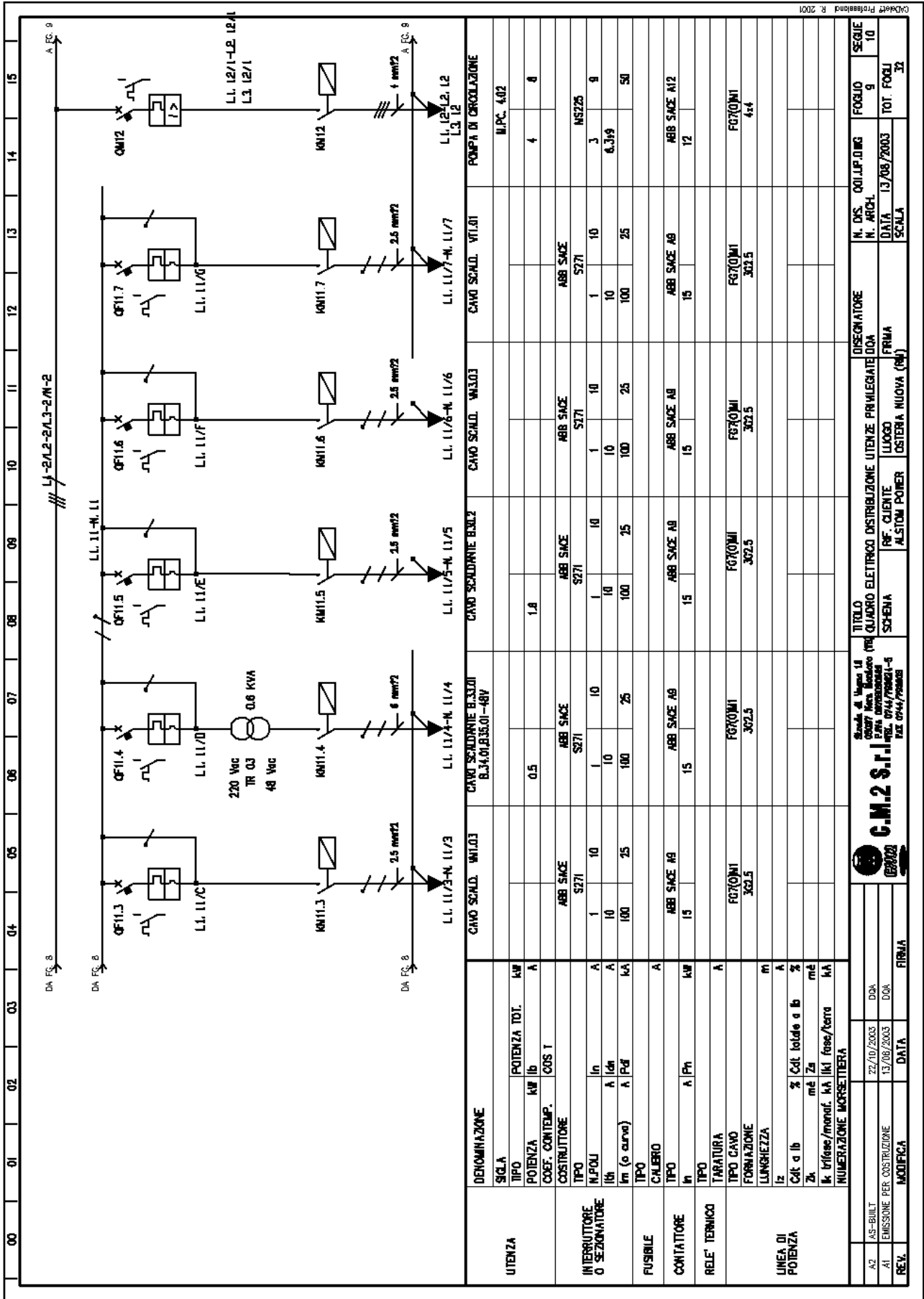


Tavola VI b) – Progetto elettrico alimentazione nuova linea sali