



Ricerca di Sistema elettrico

## Studio e applicazione delle vapor chamber nei sistemi solari termici

Andrea Mariani, Nicolandrea Calabrese, Massimo Furrer

## STUDIO E APPLICAZIONE DELLE VAPOR CHAMBER NEI SISTEMI SOLARI TERMICI

A. Mariani, N. Calabrese, M. Furrer (ENEA)

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

Area: Razionalizzazione erisparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Utilizzo del calore solare e ambientale per la climatizzazione

Obiettivo: Sperimentazione e qualificazione di componenti e sistemi

Responsabile del Progetto: Nicolandrea Calabrese, ENEA

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE .....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI .....	10
2.1 IL NUOVO PANNELLO SOLARE .....	10
2.2 USO DELLA “VAPOR CHAMBER”).....	15
2.3 REALIZZAZIONE DEL PANNELLO SOLARE .....	19
2.4 RISULTATI SPERIMENTALI .....	33
3 CONCLUSIONI .....	71

## Sommario

L'obiettivo della presente trattazione è la verifica del comportamento termico di un nuovo tipo di collettore solare a pannelli piani in cui si integra all'interno dello stesso il serbatoio di accumulo del fluido vettore.

Sempre più spesso la limitazione principale dell'uso degli impianti di riscaldamento a pannelli solari piani è il divieto posto da molti comuni di installare pannelli solari piani con serbatoi di accumulo esterni, in quanto antiestetici specie se posti in centri storici di particolare rilievo paesaggistico.

Per ovviare a ciò è stato messo a punto un sistema che prevede un pannello integrato in cui la funzione di serbatoi di accumulo viene svolta dal pannello solare stesso, risultando così senza brutte appendici esterne. L'unico inconveniente è uno spessore lievemente maggiore (dell'ordine dei 5 centimetri) del pannello stesso.

Usando una particolare conformazione fra la piastra ricevente, il tubo assorbente ed il serbatoio sottostante si riesce ad evitare anche l'uso di apparecchiature di movimento del fluido, solamente utilizzando la convenzione naturale che si instaura nell'elemento singolo del pannello solare.

L'uso della vapor chamber (essenzialmente un flat heat pipe) posta fra la piastra assorbente ed il tubo ricevitore favorirà l'instaurarsi del moto convettivo che fa da pompa al fluido vettore.

Saranno provati sia pannelli completi che un singolo elemento del pannello stesso in laboratorio, in modo da strumentarlo adeguatamente.

## 1 Introduzione

I collettori o pannelli solari sono il cuore di un impianto solare termico: il loro scopo è infatti di trasformare la radiazione solare in energia termica tramite un fluido termovettore che attraversa il collettore stesso. Il collettore solare termico (senza concentratori) è quindi un dispositivo in grado di “raccolgere” una frazione della potenza solare incidente trasformandola in potenza termica fornita ad un fluido termovettore, figura 1:

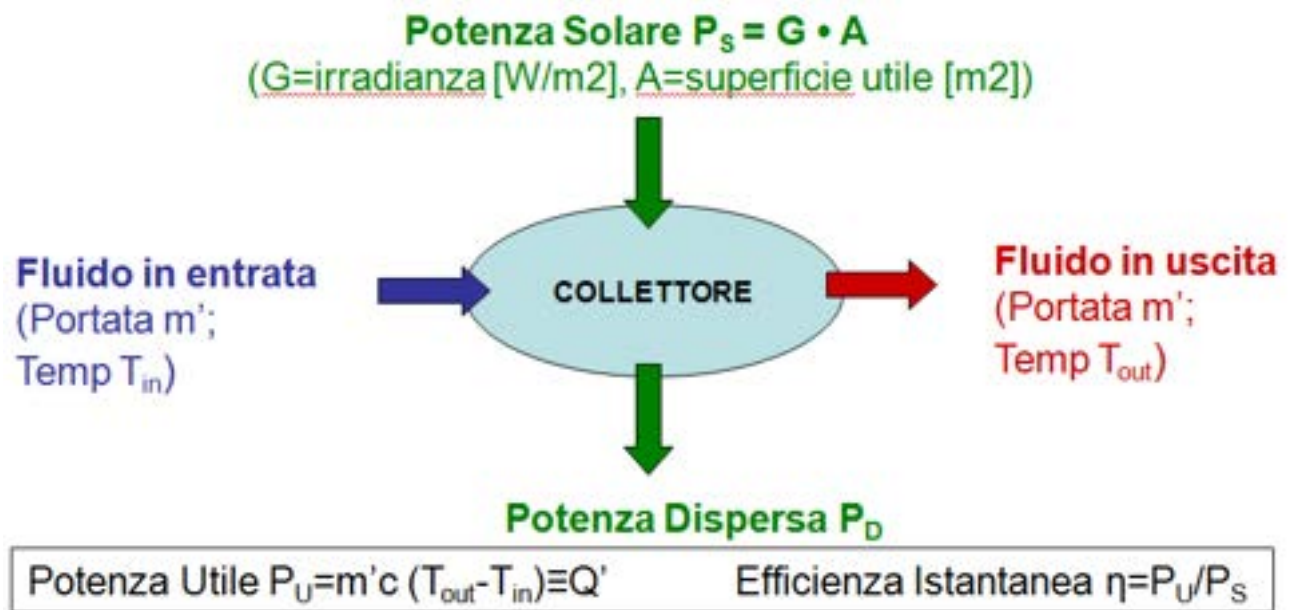


Fig. 1 – Potenza utile ed efficienza di un collettore solare

Ne esistono di diversi modelli con campi di applicabilità profondamente diversi, ma lo schema principale di funzionamento è pressoché lo stesso per tutti.

La parte principale è costituita da una piastra captante capace di massimizzare la quantità di radiazione solare assorbita trasformandola in calore. A stretto contatto con la piastra captante circola il fluido termovettore che raccoglie il calore prodotto per condurlo all’utente. Nelle sue linee principali un collettore solare non è molto diverso da un qualsiasi scambiatore di calore, ma le necessità di isolamento e di massimizzazione di captazione lo rendono un oggetto molto particolare e variegato a seconda dell’uso necessario.

Per alimentare gli impianti di condizionamento ad energia solare esistono diverse tipologie di collettori solari sul mercato che si dividono in funzione della tipologia di collettore e della temperatura alla quale sono in grado di operare, figura 2 e 3:

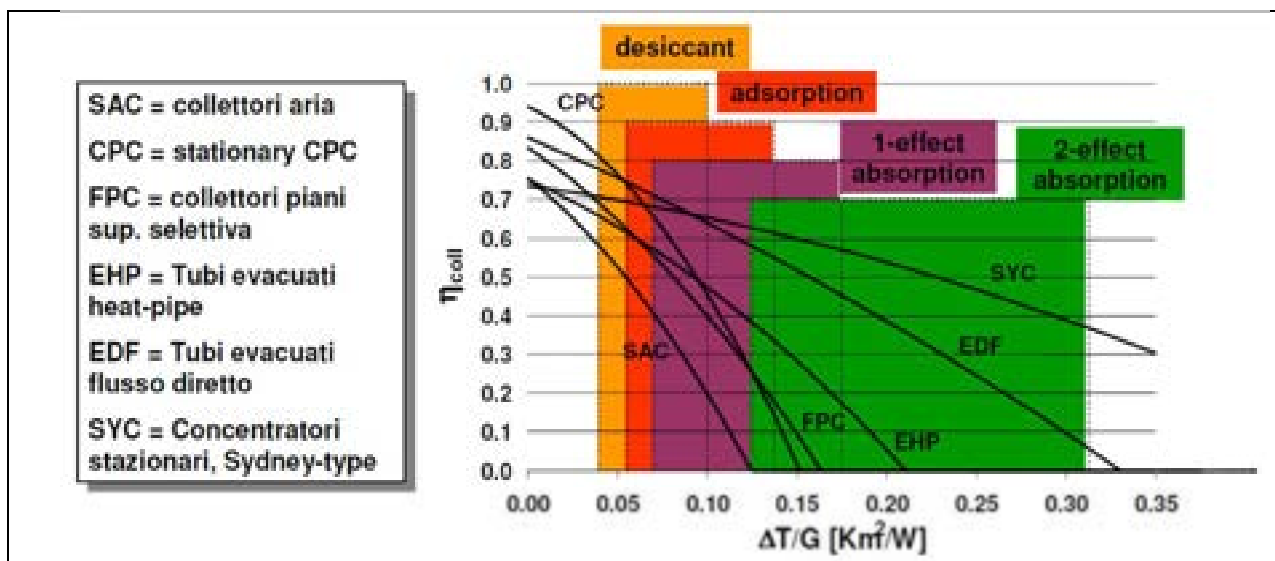


Fig.2 - Impiego dei collettori solari in funzione del tipo di macchina frigorifera

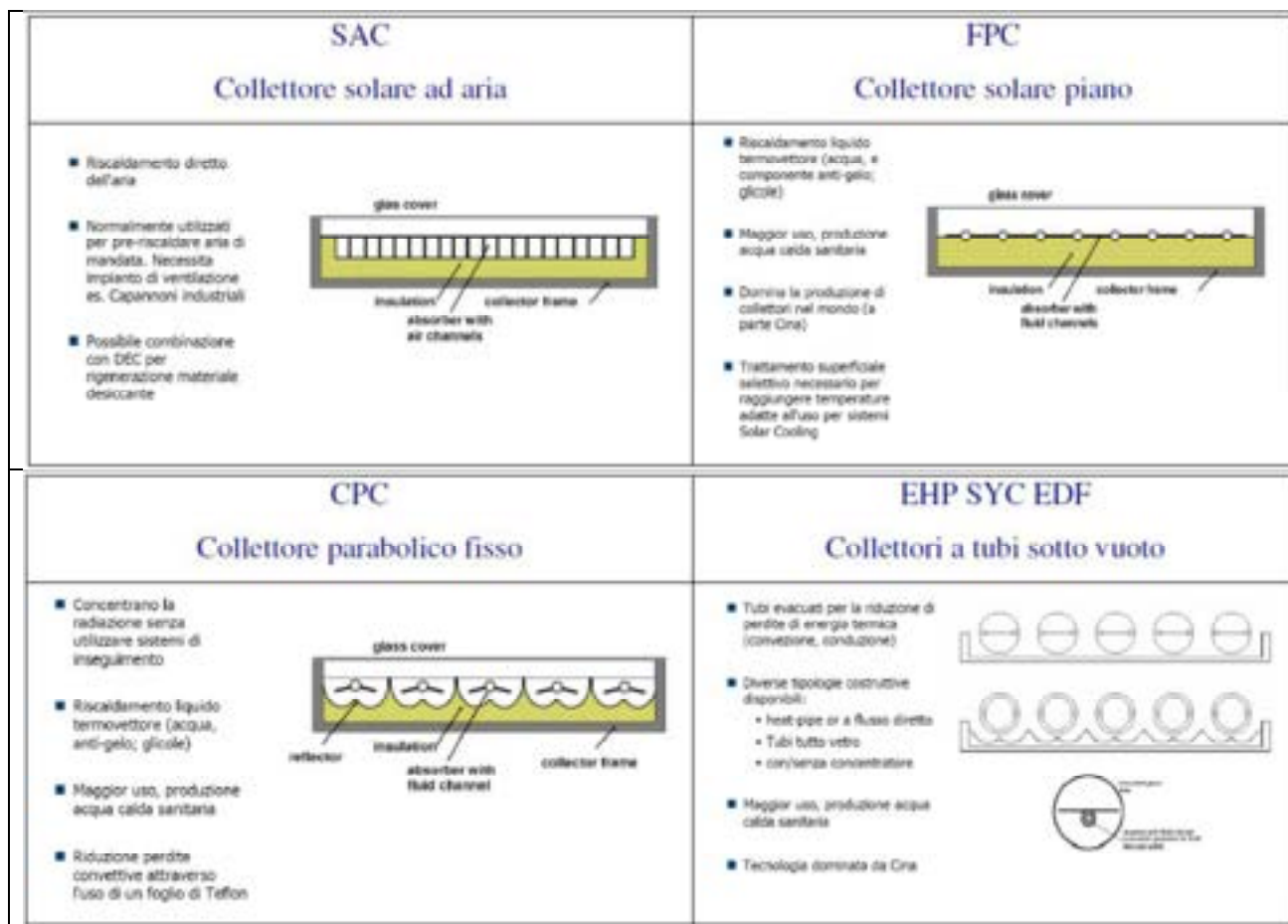


Fig. 3 - Tipologie collettori solari termici

I collettori solari piani standard possono trovare impiego limitatamente ai sistemi che operano secondo il ciclo del desiccant cooling (valore minimo di temperatura pari a circa 55 °C). Nelle configurazioni

impiantistiche che utilizzano macchine frigorifere ad adsorbimento o ad assorbimento a singolo effetto, l'impiego di collettori solari piani con superficie captante selettiva è limitato alle sole aree caratterizzate da valori molto elevati della radiazione solare.

Per le altre situazioni e per macchine frigorifere che richiedono un'elevata temperatura di funzionamento, devono essere previsti collettori solari ad alta efficienza (ad esempio, collettori sotto vuoto).

#### Collettori solari piani (FPC)

I collettori solari piani sono i principali pannelli stazionari, sono fra i primi ad essere stati realizzati e sono sicuramente i più utilizzati. Consentono di produrre acqua calda a temperature relativamente basse (dai 25 per collettori scoperti ai 70 °C per collettori con doppia copertura e vernici selettive):

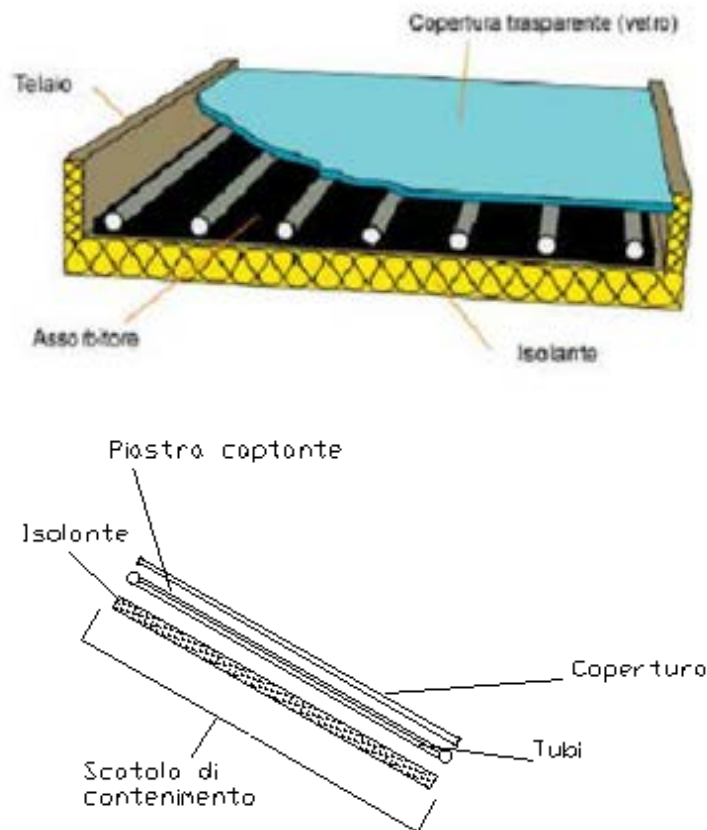


Fig.4 - Struttura di un collettore solare piano

La figura 4 mostra la struttura di un collettore piano. L'elemento principale è l'assorbitore, che ha la funzione di assorbire la radiazione solare incidente a onde corte e di trasformarla in calore (trasformazione fototermica).

Solitamente il collettore è composto da un metallo con buona capacità di condurre il calore (per esempio il rame) e dovrebbe riuscire a trasformare il più completamente possibile la radiazione solare in calore. Possono essere impiegati assorbitori dotati di un cosiddetto strato selettivo, che determina un alto grado di assorbimento ( $\alpha > 0,95$ ) nel range delle lunghezze d'onda della radiazione solare e contemporaneamente irradiano poca energia, grazie a un basso fattore di emissività ( $\epsilon < 0,1$ ) nelle lunghezze d'onda della radiazione termica. Gli strati selettivi possono essere ottenuti con procedimento galvanico (cromo, alluminio con pigmentazione al nickel) oppure applicati sotto vuoto.

Un buon contatto termico tra l'assorbitore e i tubi ove scorre il fluido termovettore in circolazione (per esempio acqua, glicole oppure aria) permette la cessione del calore al fluido termovettore e di conseguenza il trasporto fuori dal collettore del calore pronto per essere usato.

Per ridurre le dispersioni termiche e per migliorare il rendimento del collettore, l'assorbitore viene provvisto di una copertura trasparente frontale, mentre lateralmente e sul retro viene coibentato.

Gli elementi costitutivi principali sono:

- COPERTURA: si tratta di una piastra che copre frontalmente la piastra captante. Il suo scopo è quello di lasciar passare i raggi solari e di impedire la dispersione di calore nella stessa direzione. Le perdite di calore sono per conduzione, per irraggiamento e per convezione.

Le prime non sono quasi presenti frontalmente poiché non vi è contatto diretto fra la piastra captante e la copertura. Le perdite per irraggiamento sono impedito mediante la scelta di opportuni materiali per la copertura; il più usato è il vetro poiché presenta un'alta trasmittanza per le radiazioni nella frequenza del visibile (se vetro a basso contenuto di ferro circa 0,85-0,90 per radiazione ad incidenza normale) e contemporaneamente una bassa trasmittanza per le radiazioni nel campo dell'infrarosso emesse dalla piastra captante (approssimabile addirittura a zero). Sono usati anche materiali plastici, benché presentino peggiori caratteristiche nei confronti della radiazione infrarossa (la trasmittanza arriva a 0,40) e presentino il problema di degradare nel tempo per la permanenza ad alte temperature e per l'esposizione prolungata ai raggi ultravioletti; questo ne limita molto l'impiego. I vantaggi sono le caratteristiche meccaniche che ha la plastica nei confronti del vetro, infatti non teme rotture per sassi o altri oggetti urtanti, inoltre la possibilità di realizzare film sottili permette di limitare notevolmente la massa del pannello.

Le perdite di tipo convettivo sono le più pericolose. Infatti la piastra scalda l'aria a contatto generando spontaneamente moti convettivi. Il fenomeno è limitato mediante l'uso di una doppia copertura di vetro, in tale modo si crea un sottile strato di aria che fa da isolante; ovviamente in questo modo diminuisce la trasmittanza del materiale. Un altro modo è l'uso di coperture in policarbonato alveolare, questo materiale presenta al suo interno intercapedini di aria che non ne permettono il movimento e diminuiscono notevolmente queste perdite; lo svantaggio è che si tratta di materiale plastico.

- PIASTRA CAPTANTE: è il cuore del pannello; la sua funzione è quella di captare la massima radiazione solare e di trasformarla in calore, limitando al minimo le perdite dello stesso. È realizzata normalmente in rame o acciaio ed è trattata superficialmente con vernici scure e opache o addirittura selettive, per ottenere alta assorbanza nel campo del visibile e bassa emittanza per le alte lunghezze d'onda.

- TUBI: sono posti a stretto contatto con la piastra captante, talvolta addirittura saldati con essa, per ottenere il miglior scambio termico possibile. Normalmente sono realizzati in rame per l'ottima resistenza alla corrosione. Sono attraversati dal fluido termovettore che viene condotto allo scambiatore o all'accumulo a seconda dell'impianto.

- ISOLANTE: è usato per separare la piastra assorbente e i tubi dalla scatola di contenimento. Deve limitare essenzialmente le perdite per conduzione. È realizzato in materiali con struttura porosa, generalmente poliuretano, lana di poliestere, lana di vetro o lana di roccia. Per evitare l'umidità spesso è rivestito con un foglio di alluminio che ferma la condensa.

- SCATOLA DI CONTENIMENTO: raccoglie tutti i componenti del collettore conferendogli compattezza e resistenza meccanica, nonché protezione da sporco ed agenti atmosferici. È realizzata generalmente in acciaio inossidabile, alluminio anodizzato e, più raramente, in vetro resina.

- FLUIDO TERMOVETTORE: la sua funzione è quella di trasportare il calore dalla piastra captante all'utilizzatore. È necessario che abbia un'elevata densità per limitare le dimensioni dei tubi, un alto calore specifico e che non eserciti un'azione corrosiva sulle pareti dei tubi, deve essere inoltre stabile e chimicamente inerte per le temperature di utilizzo. Il fluido più economico che possiede tutte queste caratteristiche è l'acqua, con l'unico inconveniente di congelare a 0° C a pressione atmosferica. Questo problema è ovviato con l'aggiunta di glicole etilenico o propilenico. In caso di sistemi aperti, cioè in cui il fluido passante nel pannello sia lo stesso utilizzato dall'utente, c'è bisogno di acqua senza aggiunte, con ovvi problemi di congelamento nei mesi invernali e nelle ore notturne. Altro problema dell'acqua è la durezza, per questo motivo l'acqua utilizzata è preventivamente trattata.

Esistono anche sistemi di questo tipo ad aria (collettori solari SAC): vengono utilizzati prevalentemente per riscaldamento degli ambienti, quasi mai per produrre acqua calda. Sono evidenti le differenze fra i fluidi termovettori acqua e aria. L'aria presenta un coefficiente di scambio termico e una capacità termica nettamente minori dell'acqua, è quindi necessario prevedere per questi pannelli superfici molto più ampie di scambio termico piastra captante – fluido termovettore. L'aria normalmente non è costretta attraverso dei tubi, bensì passa per feritoie ottenute fra la piastra captante e l'isolante.



Fig.5 - Sistema solare a circolazione naturale per la produzione di acqua calda sanitaria con collettori solari piani idraulicamente connessi a un bollitore d'accumulo.

In figura 5 viene riportata la fotografia di un pannello solare a pannelli piani con l'antiestetico serbatoio di accumulo di cui si vuole l'eliminazione.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

### 2.1 Il nuovo pannello solare

Per ovviare all'assenza del serbatoio esterno, l'idea di base è quello di posizionare dei piccoli serbatoi, posti al di sotto del tubo ricevitore, uno per ogni tubo ricevente, figure 6. In questa maniera il grosso serbatoio esterno viene sostituito da tanti piccoli serbatoi interni al pannello stesso, la somma dei volumi però è la stessa del volume che si aveva in precedenza per il serbatoio esterno.

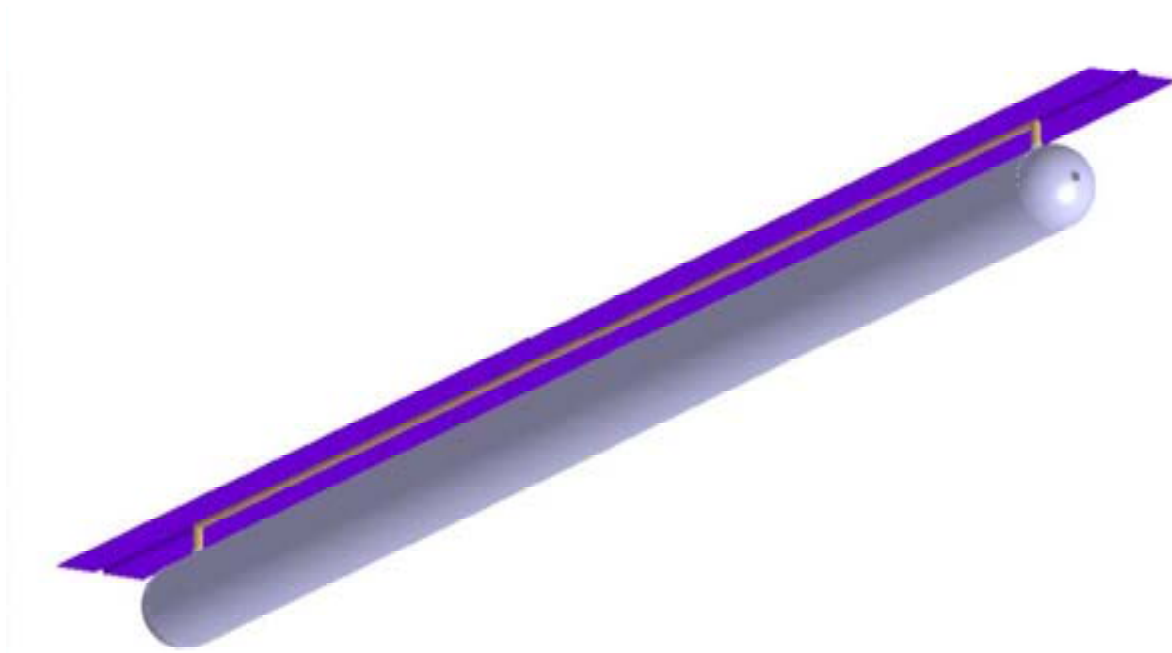


Fig.6 – Schema del nuovo pannello solare.

Per semplificare la struttura del pannello solare e ridurre in modo sensibile i costi di produzione, la circolazione del fluido vettore, nel nostro caso la stessa acqua di rete che poi sarà disponibile all'utilizzatore, sarà solamente per circolazione naturale dovuto alla differenza di densità fra l'acqua riscaldata nel tubo ricevitore e l'acqua fredda nel tubo collettore.

La differenza è uno spessore lievemente maggiore (180 mm rispetto ai 105÷126 mm) del pannello, ottimizzabile in fase di industrializzazione. Usando una particolare conformazione fra la piastra ricevente, il tubo assorbente ed il serbatoio sottostante si riesce ad evitare anche l'uso di apparecchiature di movimento del fluido, solamente utilizzando la convezione naturale che si instaura nell'elemento singolo del pannello solare.

Quindi il pannello solare integrato di serbatoio si presenta come nelle figure 7÷12, in cui vengono mostrati alcuni particolari realizzativi. I serbatoi interni sono poi collegati direttamente all'acqua di rete ed all'utenza di acqua calda. Quando c'è la richiesta di acqua calda essa viene prelevata dal tubo serbatoio, e nello stesso tempo viene reintegrata nello stesso tubo, dall'acqua di rete fredda.

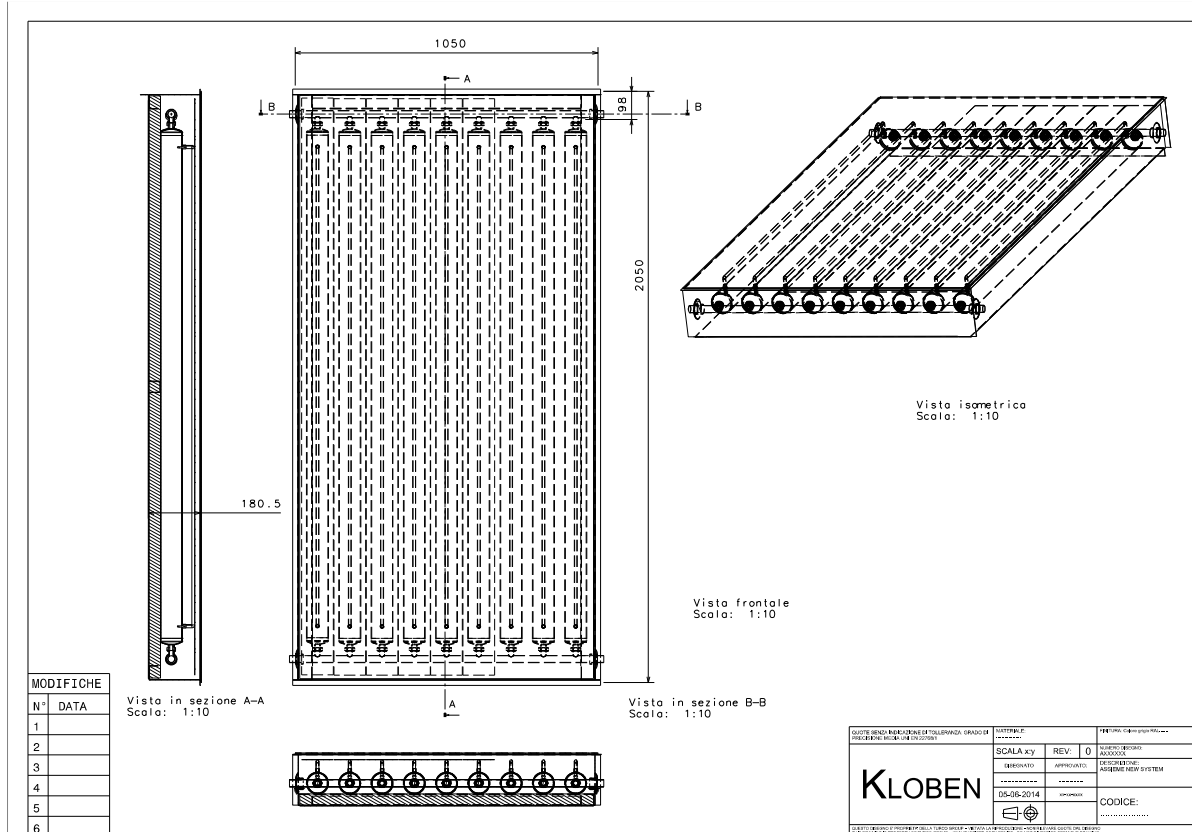


Fig. 7– Progetto del collettore solare con serbatoio sottostante.

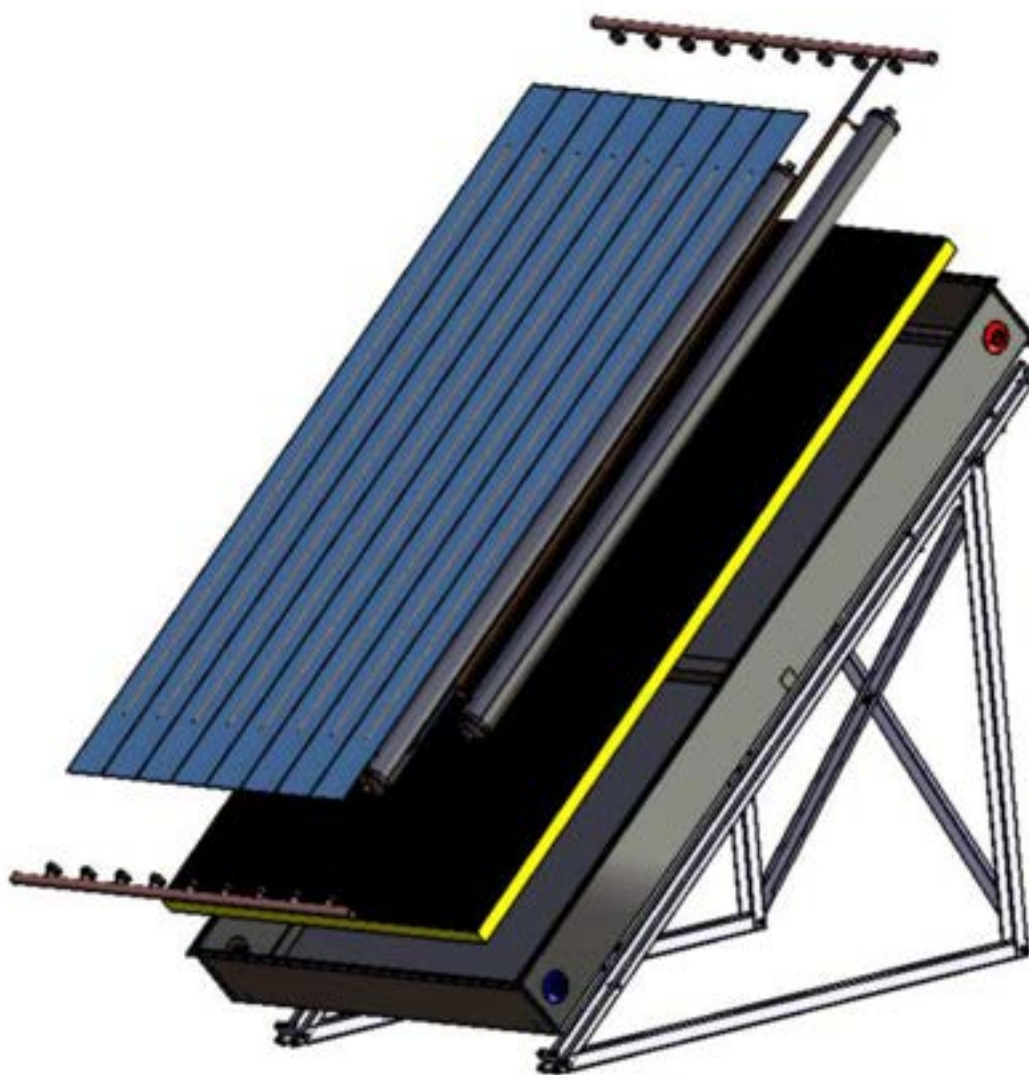


Fig. 8 – Spaccato della composizione del pannello solare.

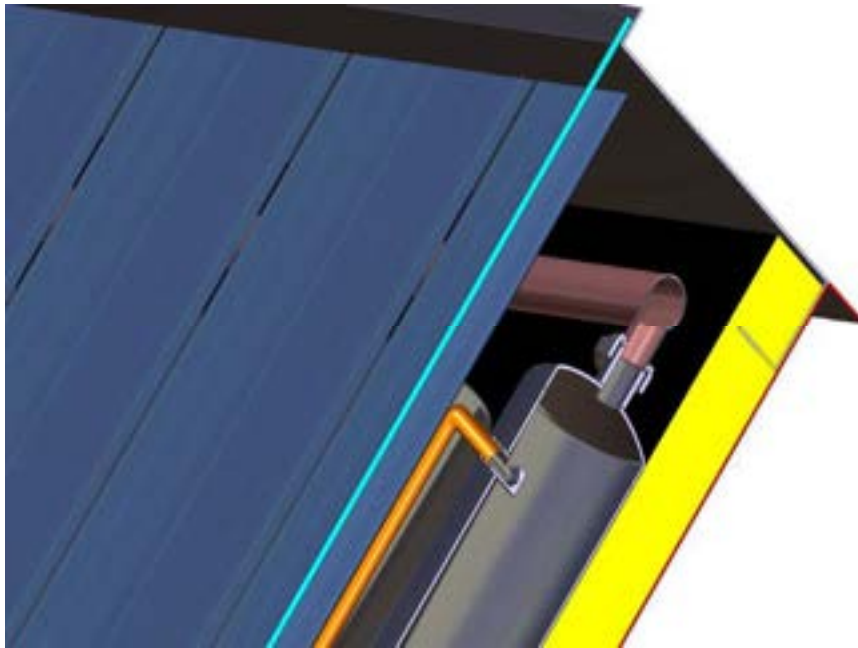


Fig. 9 – Particolare dell'attacco fra serbatoio e adduzione acqua calda all'impianto domestico.

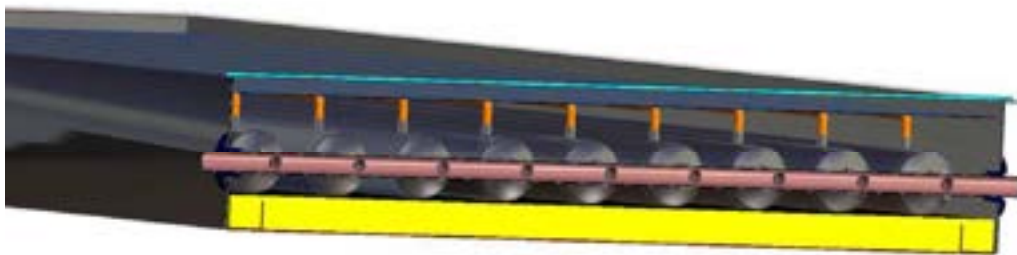


Fig. 10 – Particolare dei tubi collettori dell'acqua calda.

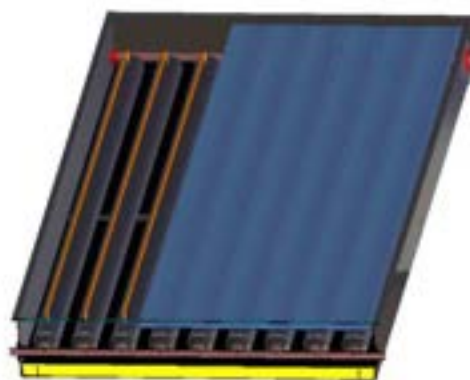


Fig. 11 – Pannello solare innovativo.



Fig. 12 – Disegno del risultato finale assemblamento nuovo collettore solare.





Fig. 14 – Foto delle vapor chamber.



Fig. 15 – Foto di una delle vapor chamber.

In figura 16 viene riportato lo schema di progetto per posizionare la vapor chamber fra la piastra assorbente ed il tubo ricevitore, mentre in figura 17 riportiamo uno spaccato di questa configurazione.

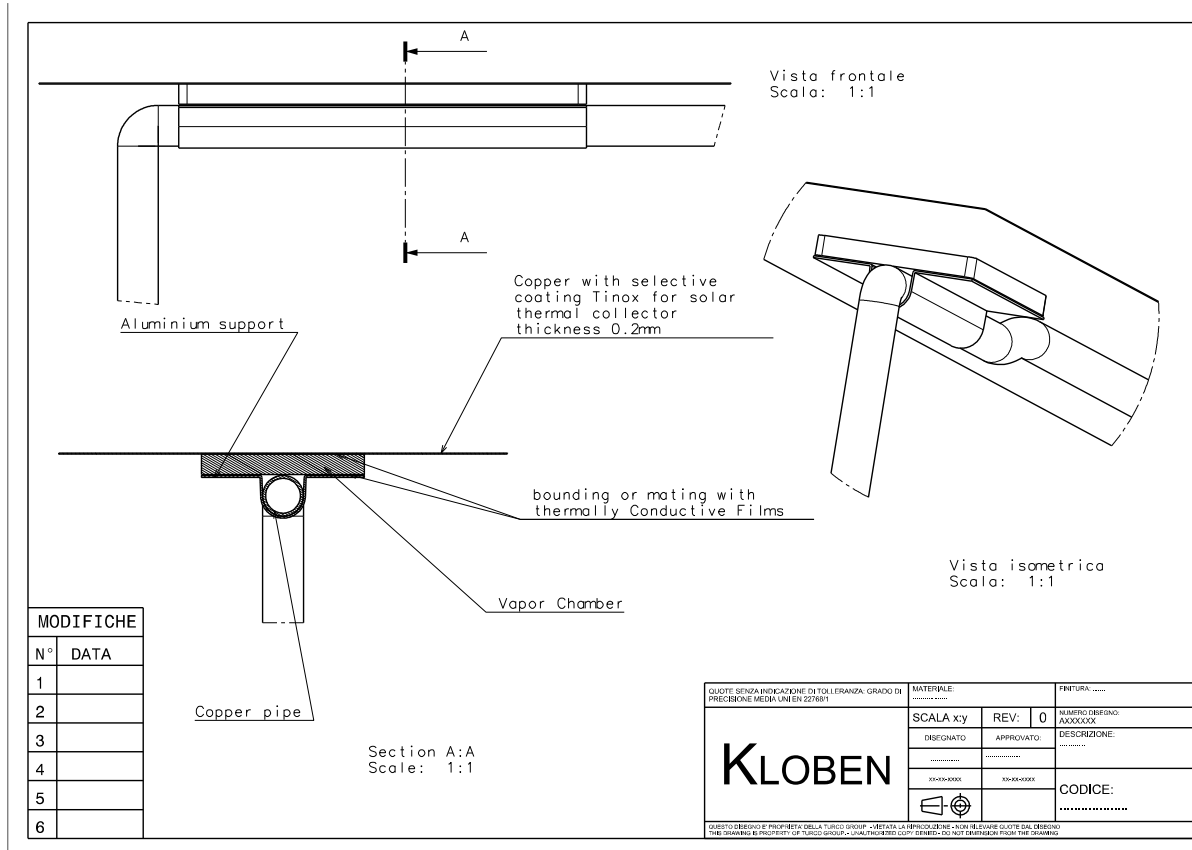


Fig. 16 – Schema progettuale della disposizione della vapor chamber fra piastra assorbente e tubo ricevitore.



Fig. 17 – Spaccato della disposizione della vapor chamber .

### 2.3 Realizzazione del pannello solare

Per la esecuzione della campagna sperimentale sono state realizzate due diverse sezioni di prova. La prima sezione di prova consiste in un solo modulo del pannello solare, debitamente strumentato. per eseguire le prove sperimentali si fa uso di una resistenza elettrica a filo avvolta intorno al tubo ricevitore che simula la radiazione solare incidente per non dipendere dalle condizioni atmosferiche esterne. Per questo motivo in questa sezione di prova è assente la piastra assorbente. In figure 18 viene mostrata una foto della sezione di prova, opportunamente coibentata per evitare dannose dispersioni di calore verso l'esterno. Particolari sono riportati nelle figure 19÷22



Fig. 18 – Foto del dispositivo per prove effettuate su tubo singolo.

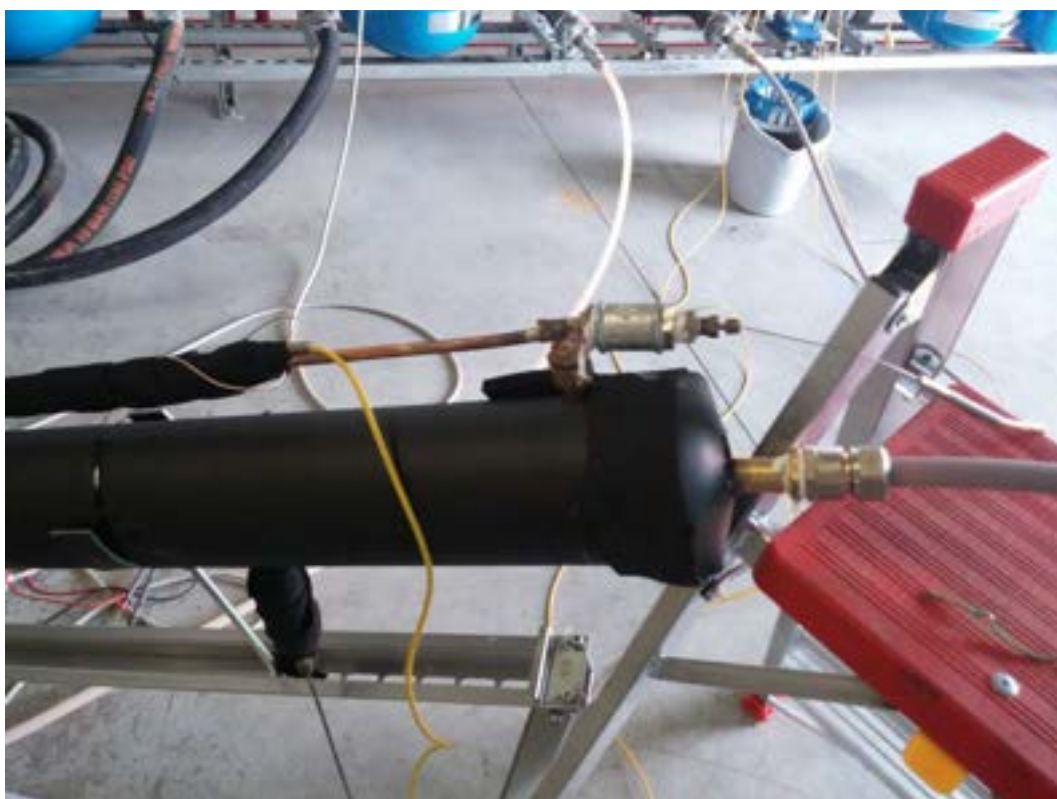


Fig. 19 – Particolare superiore del dispositivo per prove effettuate su tubo singolo.



Fig. 20 – Particolare inferiore del dispositivo per prove effettuate su tubo singolo.



Fig. 21 – Particolare centrale del dispositivo per prove effettuate su tubo singolo.

La seconda sezione di prova costruita è in realtà un pannello solare completo strumentato e pronto per le prove operative su campo. Nelle figure 23÷35 vengono mostrate delle foto delle varie fasi dell'assemblaggio del pannello solare innovativo.



Fig. 22 – Foto del dispositivo per prove effettuate su tubo singolo.



Fig. 23 – Disposizione dei tubi ricevitori e serbatoi.



Fig. 24 – Particolare dell'attacco alla rete idrica.



Fig. 25 – Immagine ingrandita dell'attacco fra tubo ricevitore e serbatoio sottostante.



Fig. 26 – Assemblaggio del pannello solare con i tubi innovativi.



Fig. 27 – Particolare dell'accoppiamento fra piastra assorbitrice e tubo ricevitore.



Fig. 28 – Particolare della piastra assorbitrice.

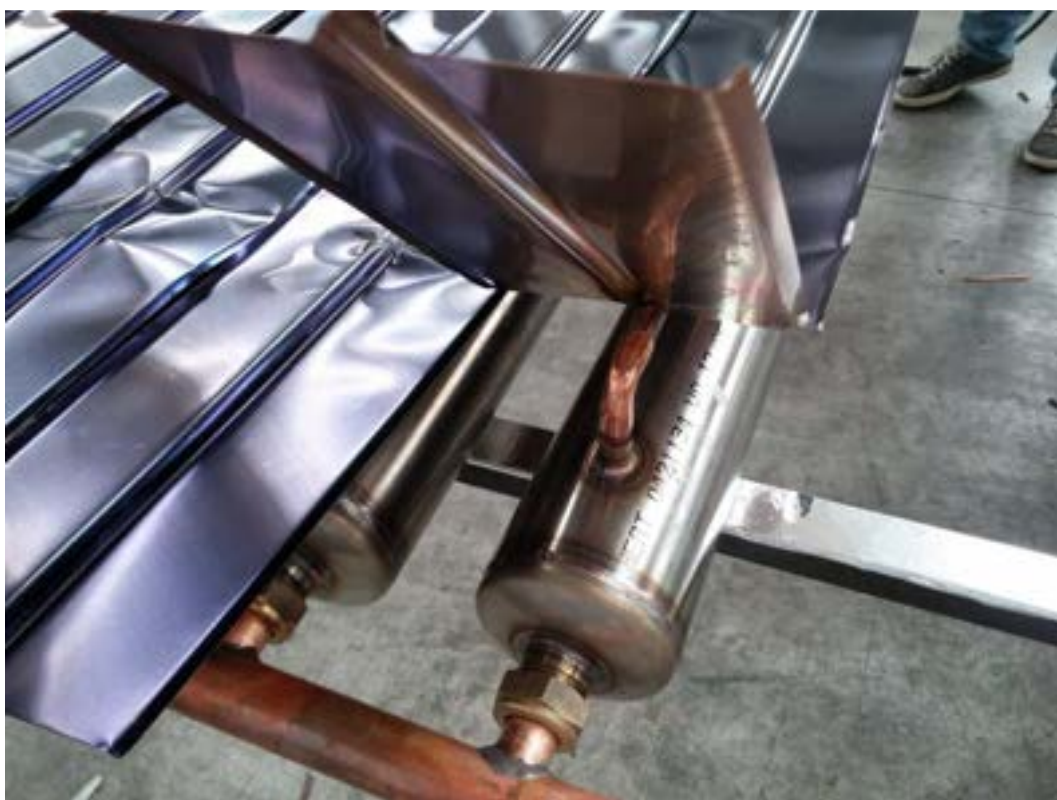


Fig. 29 – Particolare dell'accoppiamento fra piastra assorbitrice e nuovo collettore integrato.



Fig. 30 – Pannello solare assemblato (lato posteriore).



Fig. 31 – Pannello solare assemblato (lato posteriore).



Fig. 32 – Pannello solare coibentato (lato posteriore).



Fig. 33 – Pannello solare coibentato (lato posteriore).



Fig. 34 – Pannello solare assemblato (lato anteriore)..



Fig. 35 – Pannello solare assemblato (lato anteriore). Prime prove idrauliche.

## 2.4 Risultati sperimentali

In questa sezione riportiamo i risultati sperimentali ottenuti sulla “prima” sezione di prova. Le sonde di temperatura sul singolo tubo sono posizionate come riportato in figura 36. La prova viene effettuata dando potenza sempre crescente alla resistenza a filo avvolta al tubo ricevitore. In questo primo caso si simula la presenza della piastra assorbente senza la vapor chamber: quindi la resistenza è avvolta su tutto il tubo per una lunghezza totale di 1600 mm. L’angolo di inclinazione rispetto all’orizzontale è stato variato ed è pari a 15°, 30° e 45°. Tutto il sistema è stato isolato, come visto nel capitolo precedente, con uno spessore di 10 mm di neoprene.

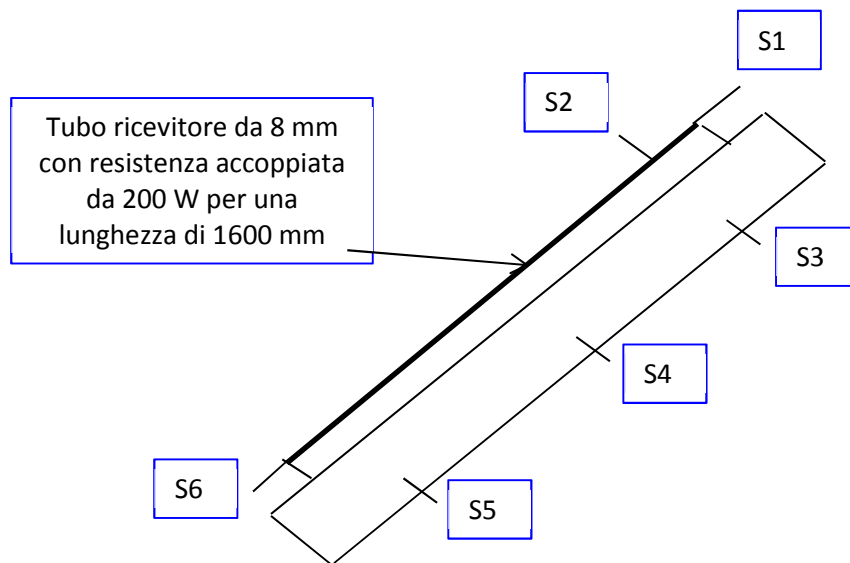


Fig. 36– Disposizione delle sonde di temperatura nel modulo. Simulazione senza vapor chamber.

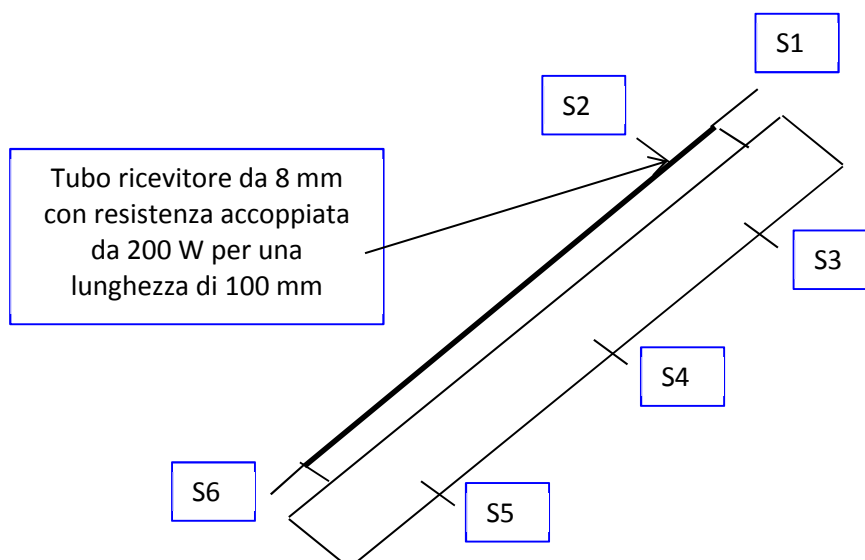


Fig. 37– Disposizione delle sonde di temperatura nel modulo. Simulazione con vapor chamber.

In figura 37 viene riportato lo schema di posizionamento delle sonde di temperatura. La prova viene effettuata dando potenza sempre crescente alla resistenza a filo avvolta al tubo ricevitore. In questo secondo caso si simula la presenza della piastra assorbente con la vapor chamber: quindi la resistenza è

avvolta solo su una lunghezza di 100 mm che simula la presenza della vapor chamber. L'angolo di inclinazione rispetto all'orizzontale, in questo secondo caso, è pari a 15° e 30°. Tutto il sistema è isolato, come nel precedente caso, con uno spessore di 10 mm di neoprene.

Le prove effettuate dando potenza su tutto l'asse del tubo ricevitore confermano l'instaurarsi della convezione naturale. In queste prima prove la potenza viene fornita nel seguente modo: una rampa di durata due ore che porta la potenza da 0 a 200W, una posizione di stazionarietà di due ore con potenza sempre a 200W ed infine una discesa da 200 a 0 W sempre in due ore, con quindi la stessa velocità, in questo caso di discesa, che era stata data in salita. Come si può vedere dalle figure 38-40 la sonda in posizione 1, più in alto nel tubo ricevitore è quella che ha una temperatura maggiore. Molto importante è notare che anche le temperature misurate all'interno del tubo collettore subiscono un aumento della temperatura dimostrando che la circolazione naturale instauratasi fa circolare l'acqua consentendo così l'utilizzo del sistema complessivo.

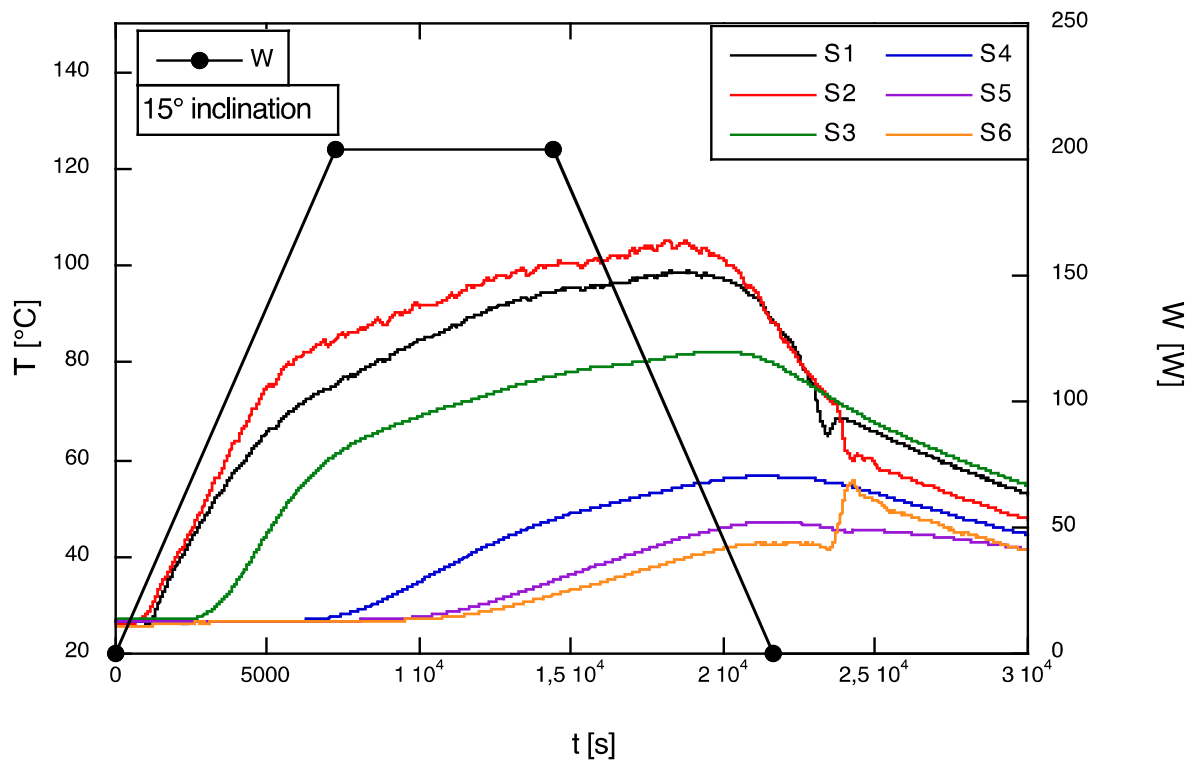


Fig. 38– Prova con tubo ricevitore da 8 mm, potenza su tutto il tubo, inclinazione di 15° .

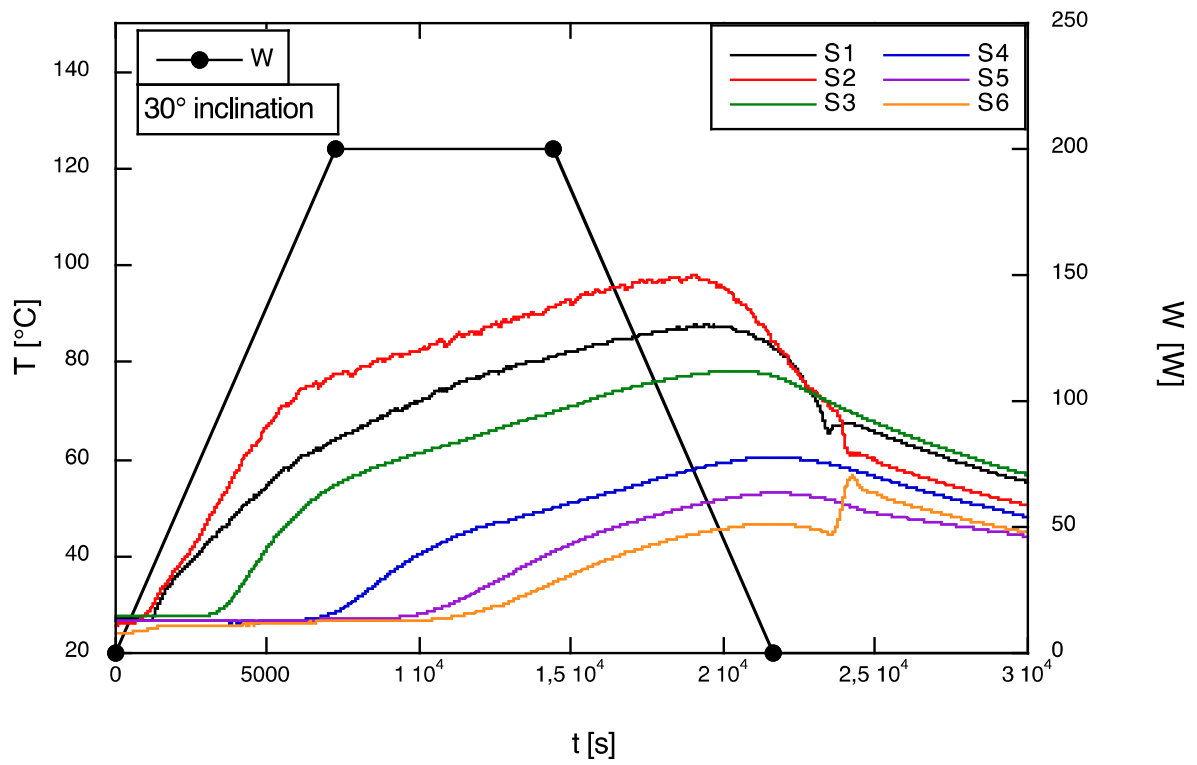


Fig. 39– Prova con tubo ricevitore da 8 mm, potenza su tutto il tubo, inclinazione di 30° .

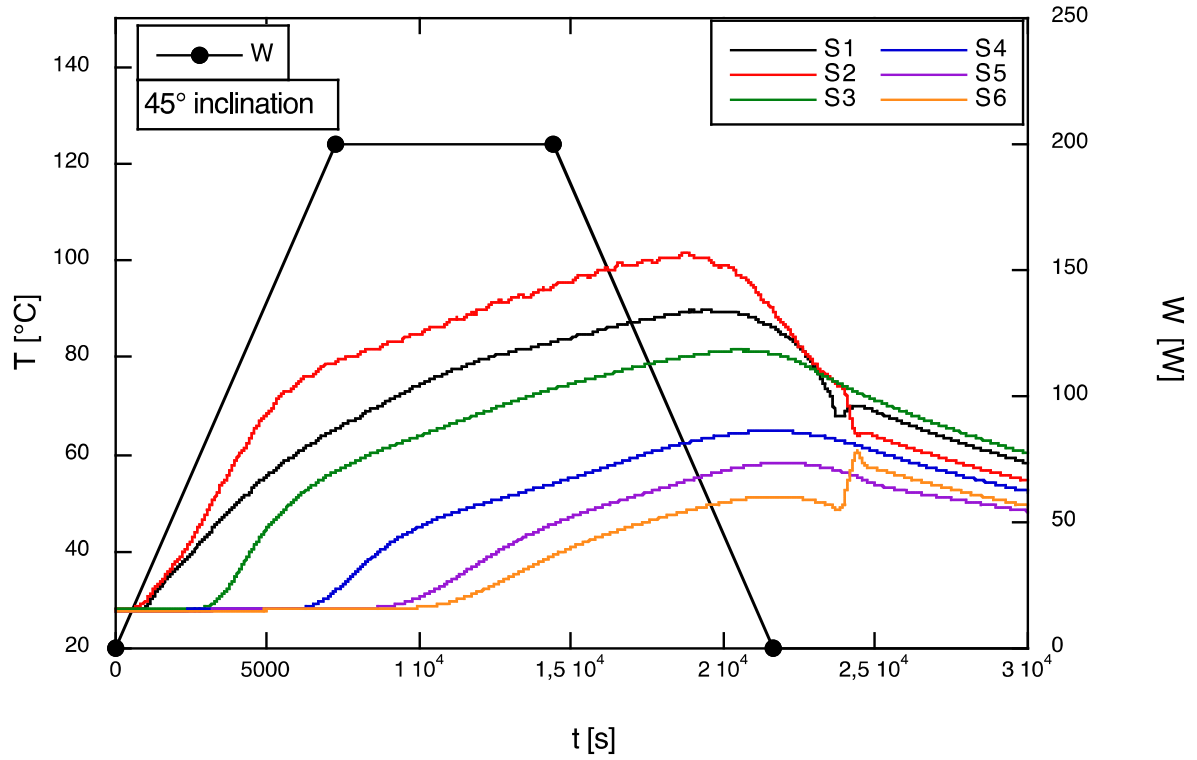


Fig. 40– Prova con tubo ricevitore da 8 mm, potenza su tutto il tubo, inclinazione di 45° .

Volendo fare un confronto fra le diverse inclinazioni si riportano le figure da 41 a 46. Da un esame di queste figure si può notare come nella parte alta del tubo ricevitore le temperature nel tubo meno inclinato siano più alte, questo comportamento, se pur meno accentuato nei valori, continua anche nella parte alta del tubo collettore. Nella parte centrale e nella parte bassa del collettore, l'andamento delle temperature si inverte, con il tubo più inclinato che presenta temperature più alte rispetto ai due meno inclinati. Questo andamento è presente anche nella parte più bassa del tubo ricevitore. Si deve considerare che questa termocoppia è posta sotto la zona riscaldata, quindi il suo valore risente molto dell'afflusso di fluido freddo dal collettore piuttosto che da una conduzione sulle parti metalliche del tubo stesso. Quindi in termini di utilizzo del collettore il tubo più inclinato è quello che meglio favorisce la circolazione naturale ed una migliore distribuzione della temperatura nel fluido presente.

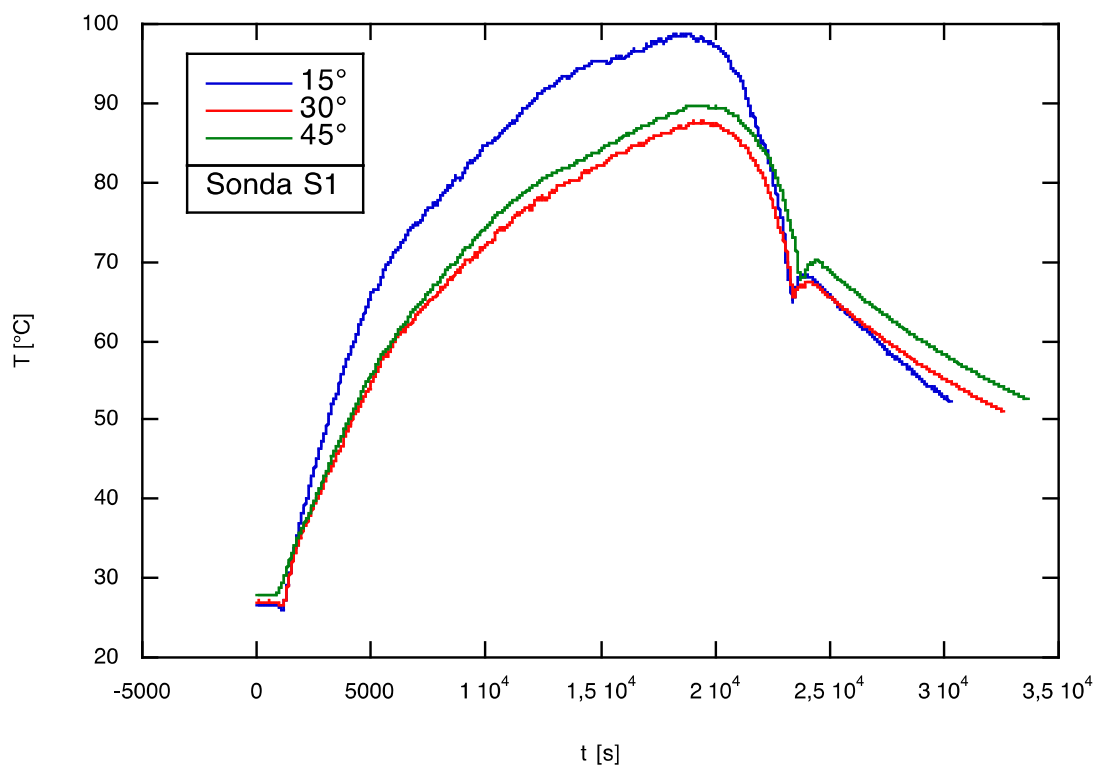


Fig. 41– Prova con tubo ricevitore da 8 mm, potenza su tutto il tubo, confronto fra le varie inclinazioni, sonda 1.

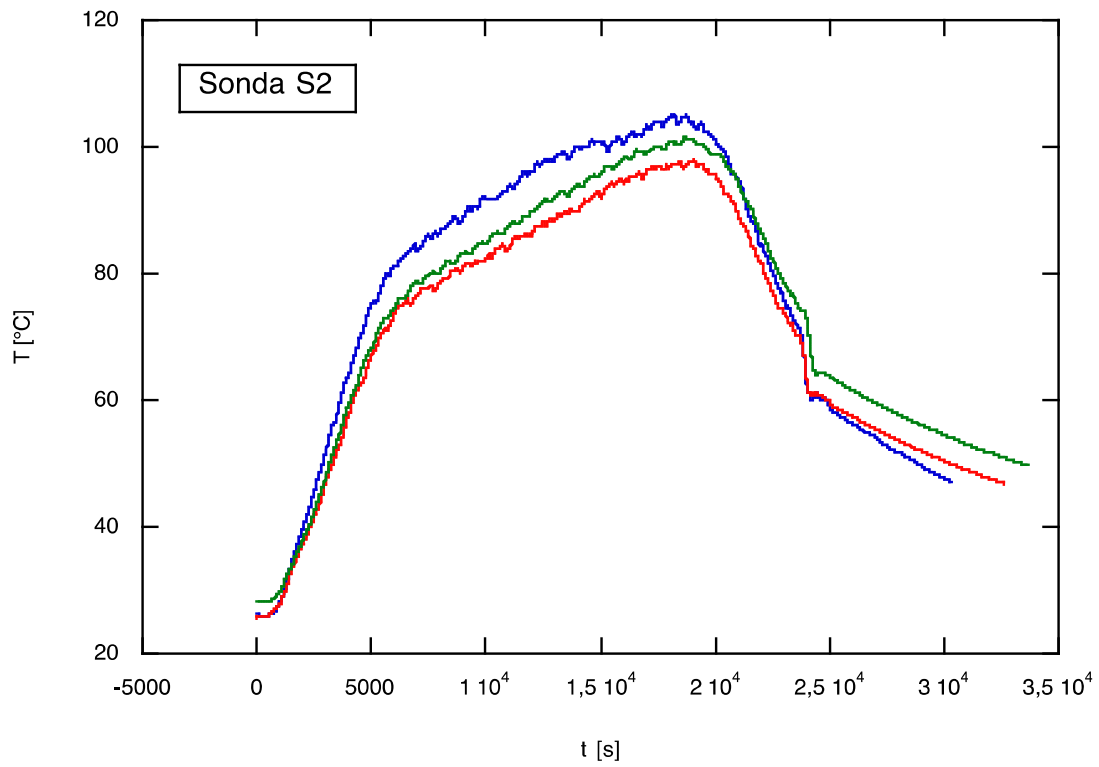


Fig. 42– Prova con tubo ricevitore da 8 mm, potenza su tutto il tubo, confronto fra le varie inclinazioni, sonda 2.

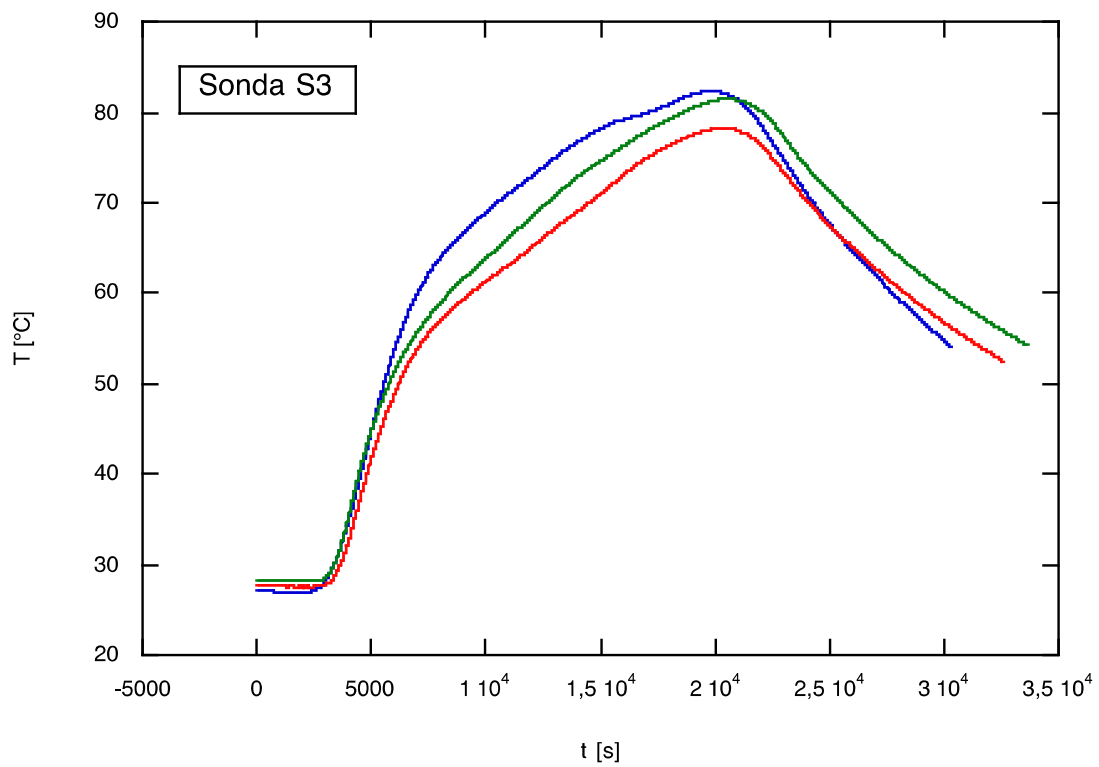


Fig. 43– Prova con tubo ricevitore da 8 mm, potenza su tutto il tubo, confronto fra le varie inclinazioni, sonda 3.

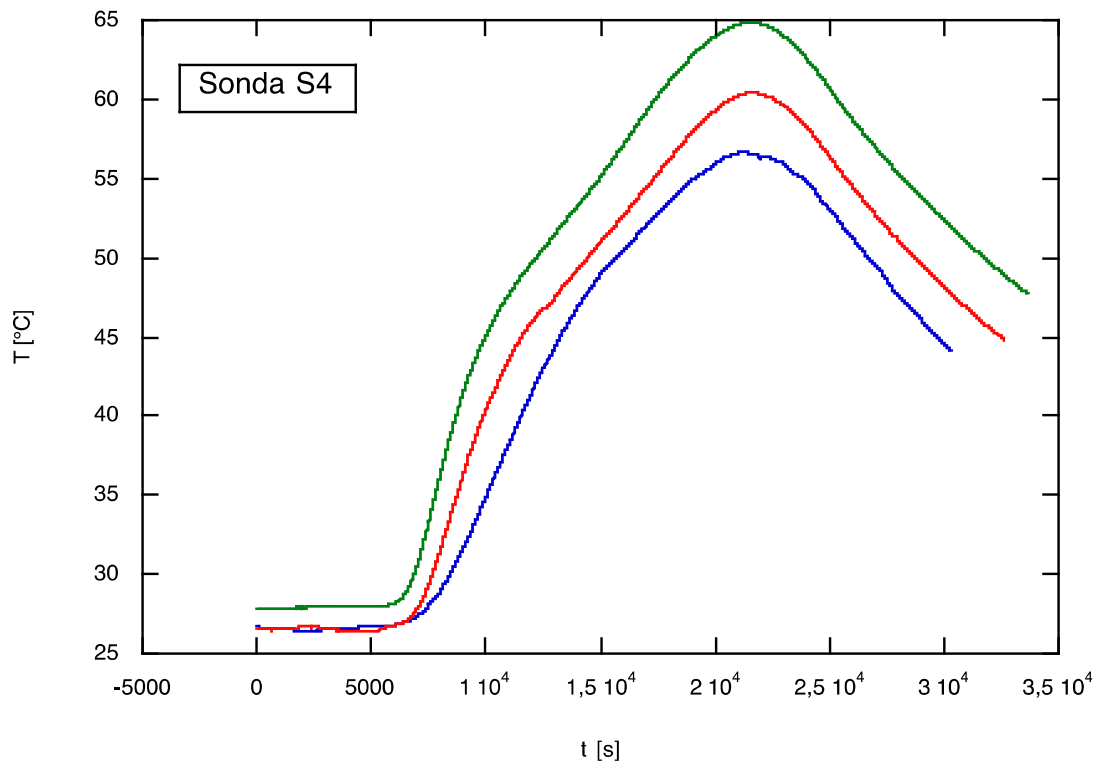


Fig. 44– Prova con tubo ricevitore da 8 mm, potenza su tutto il tubo, confronto fra le varie inclinazioni, sonda 4.

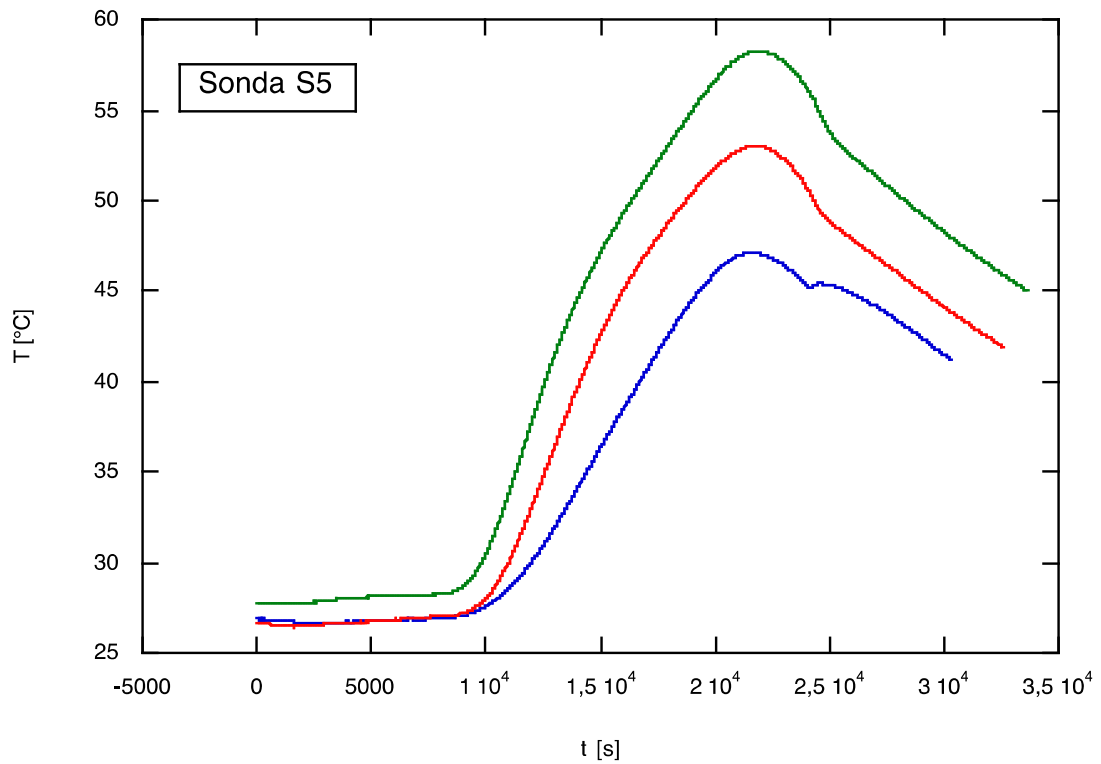


Fig. 45– Prova con tubo ricevitore da 8 mm, potenza su tutto il tubo, confronto fra le varie inclinazioni, sonda 5.

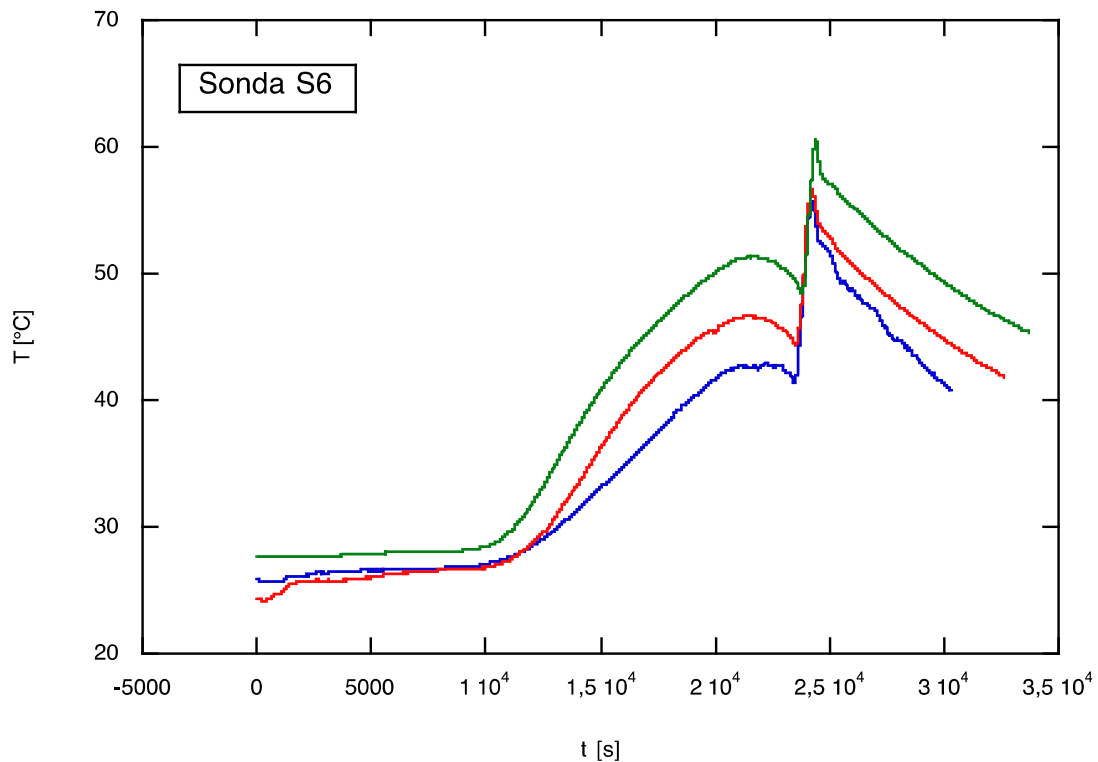


Fig. 46– Prova con tubo ricevitore da 8 mm, potenza su tutto il tubo, confronto fra le varie inclinazioni, sonda 6.

Per simulare, come primo tentativo, la presenza della vapor chamber, è stato pensato di dare potenza solo nella parte in cui sarebbe stata posizionata la vapor chamber stessa. Così la resistenza posta sopra il tubo ricevitore è lunga solo 100 mm, e quindi la potenza viene fornita solo nella estremità superiore del tubo. I risultati sono nelle figure 47 e 48 . Nel caso di inclinazione del collettore a 15° il sistema funziona instaurando la circolazione naturale, ancora una volta la termocoppia posizione in alto nel tubo ricevitore rileva la temperatura più alta, mentre le variazioni nelle temperature nel collettore indicano una buona circolazione dell'acqua nel sistema. Nel caso di inclinazione a 30° la maggiore inclinazione influisce negativamente sull'instaurarsi della circolazione naturale. Questo si evince dal fatto che le temperature nel tubo ricevitore aumentano fino ad arrivare alla vaporizzazione del fluido, mentre le temperature nel tubo collettore rimangono fisse ad indicare che l'acqua non circola ed il calore non riesce ad arrivare nel tubo collettore sottostante. Questo implica che in questo caso il sistema non funziona.

Per completezza riportiamo il confronto fra le temperature delle sonde nella stessa posizione per evidenziare il fatto che abbiamo sopra descritto. Infatti si vede chiaramente che le temperature sul tubo ricevitore sono maggiori nel caso di 30° in cui non c'è circolazione, mentre è vero il contrario, temperature maggiori nel tubo collettore nel caso di 15°, segno che la circolazione che si crea porta acqua calda nel collettore. Figure 49-54

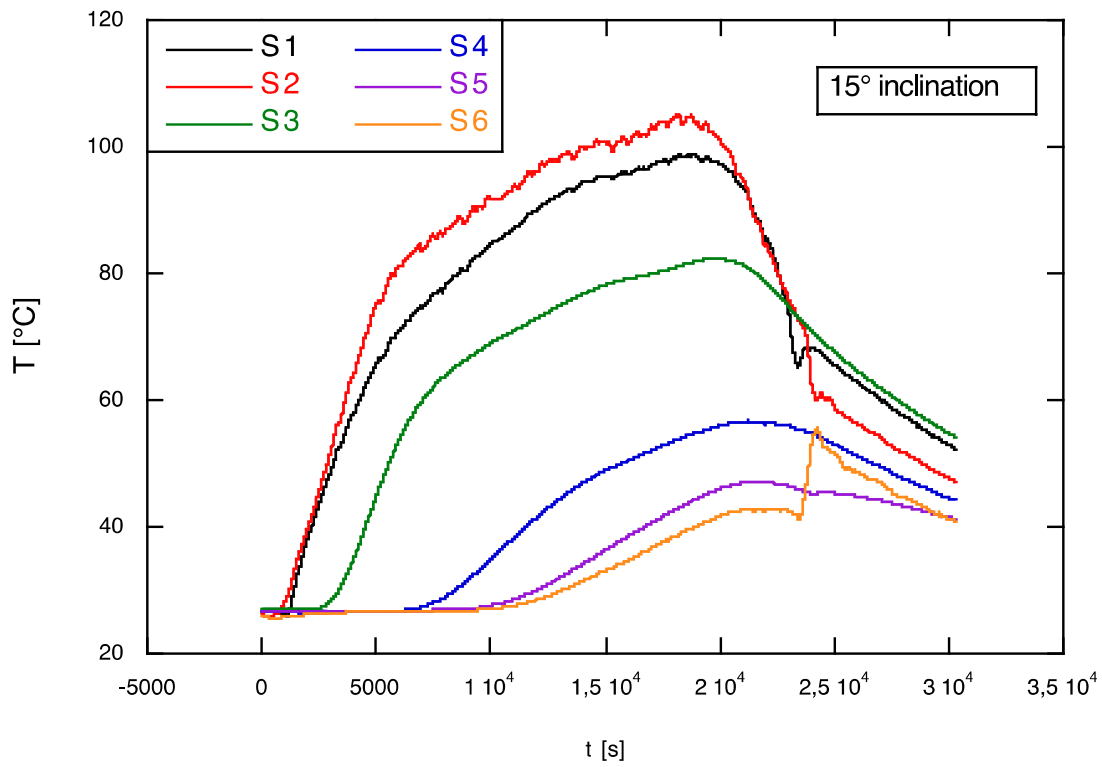


Fig. 47– Prova con tubo ricevitore da 8 mm, simulazione vapor chamber, inclinazione di 15° .

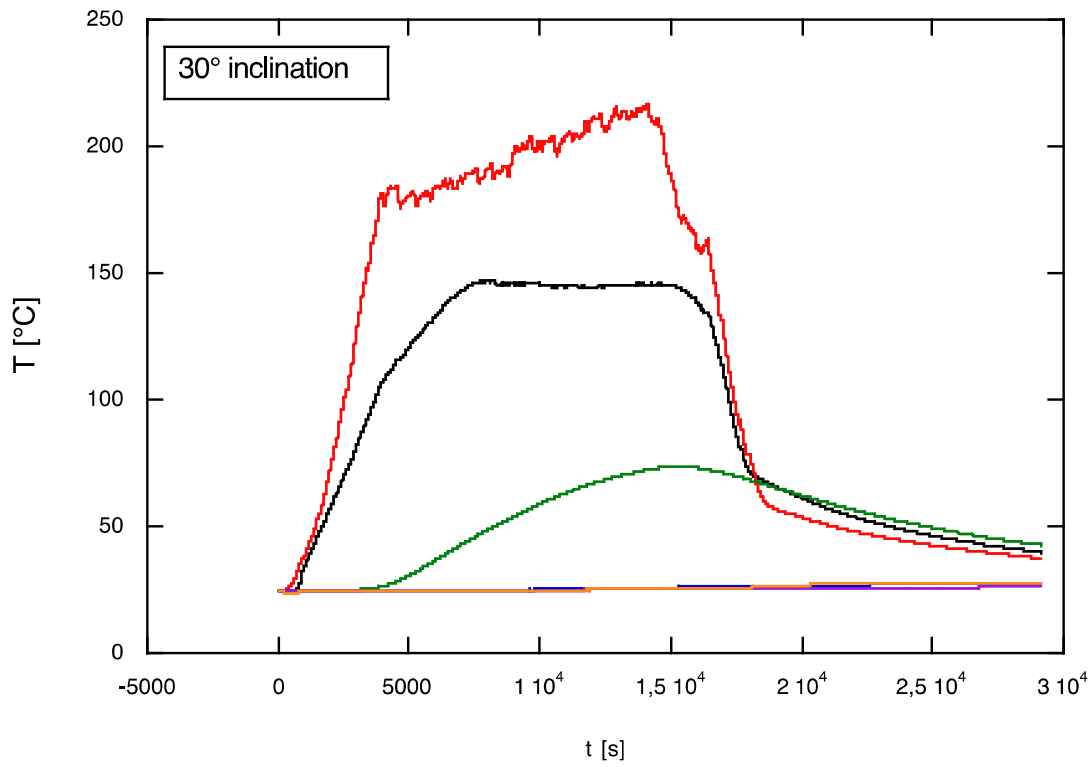


Fig. 48– Prova con tubo ricevitore da 8 mm, simulazione vapor chamber, inclinazione di 30° .

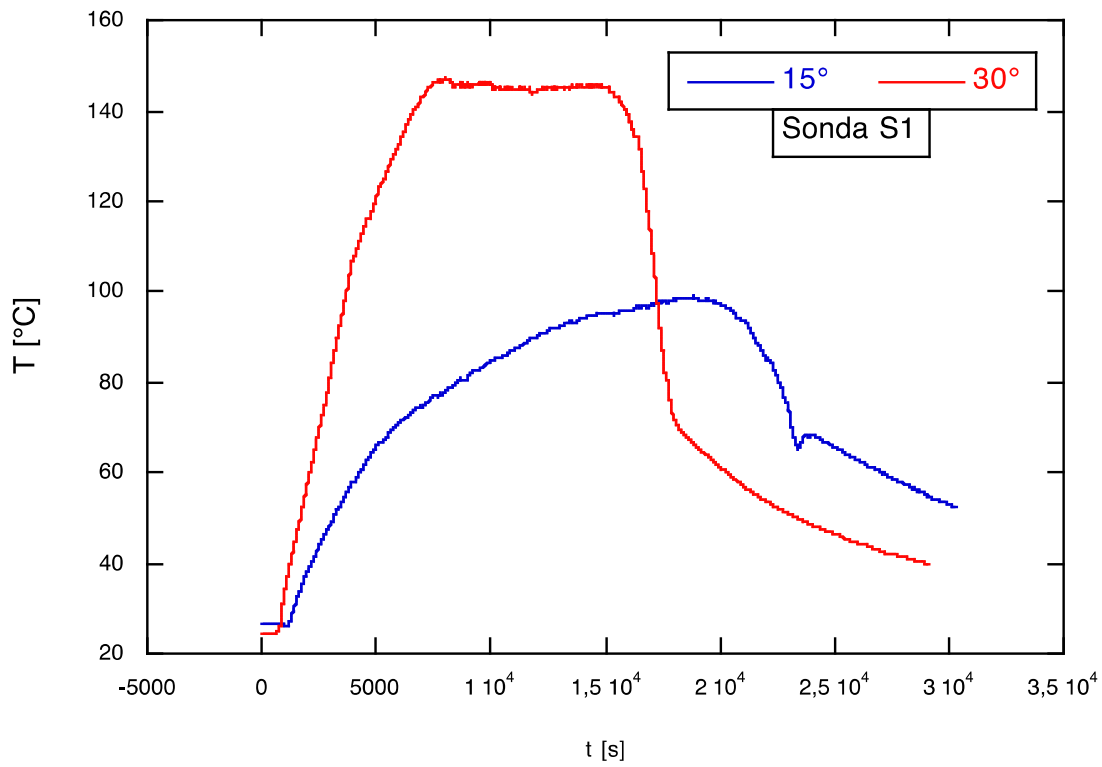


Fig. 49– Prova con tubo ricevitore da 8 mm, simulazione vapor chamber confronto fra le varie inclinazioni, sonda 1

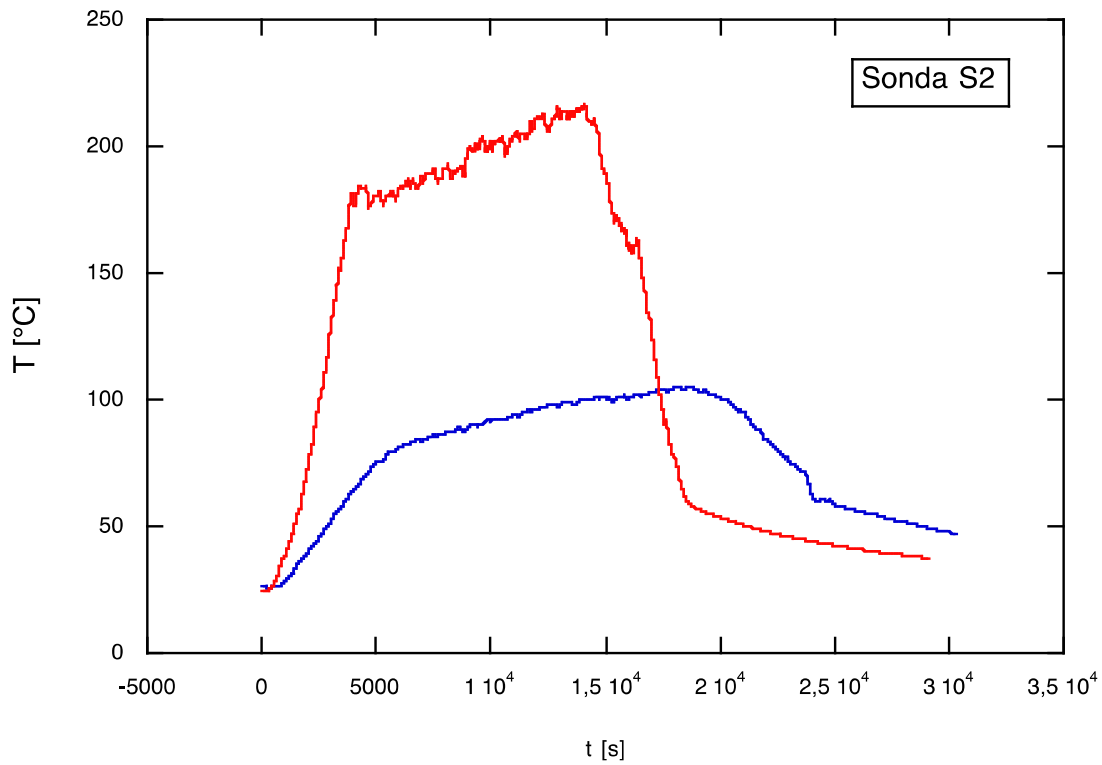


Fig. 50– Prova con tubo ricevitore da 8 mm, simulazione vapor chamber confronto fra le varie inclinazioni, sonda 2

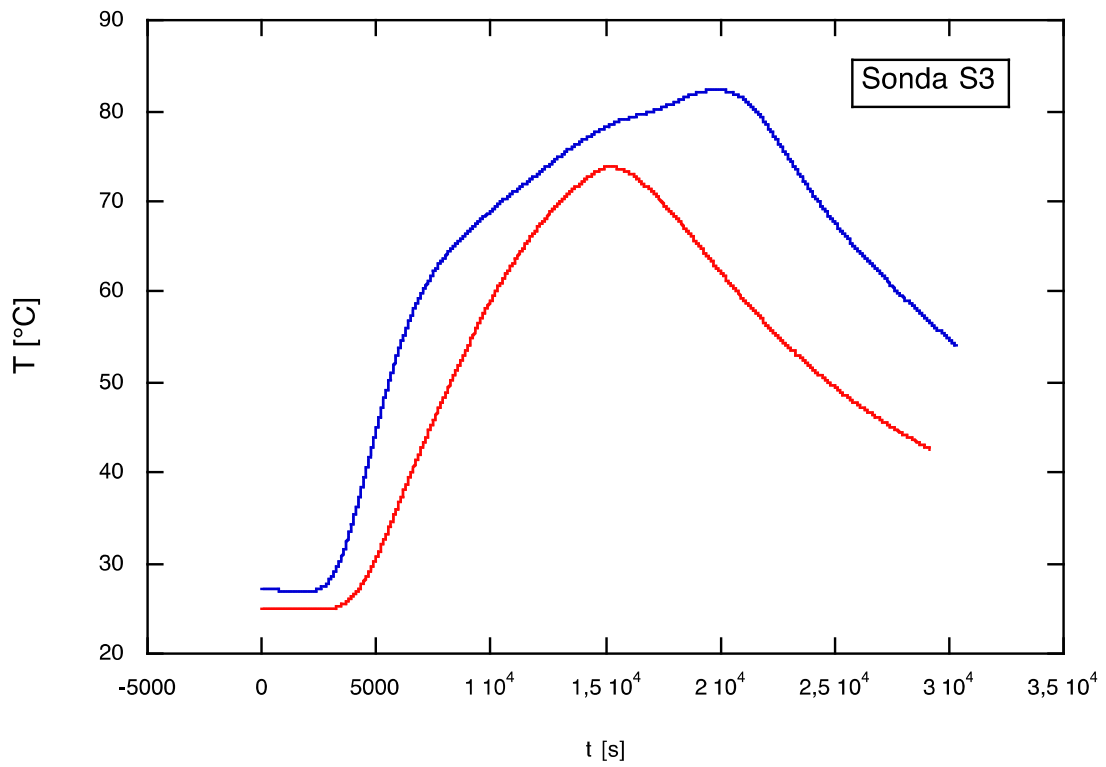


Fig. 51– Prova con tubo ricevitore da 8 mm, simulazione vapor chamber confronto fra le varie inclinazioni, sonda 3

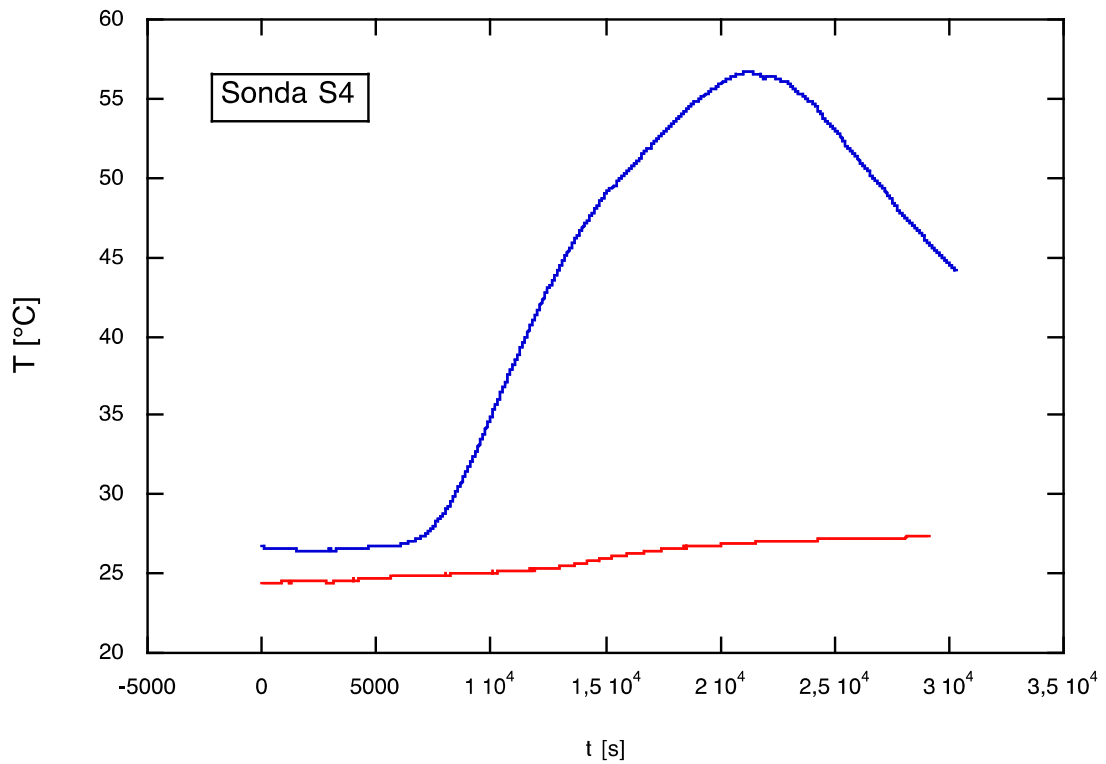


Fig. 52– Prova con tubo ricevitore da 8 mm, simulazione vapor chamber confronto fra le varie inclinazioni, sonda 4

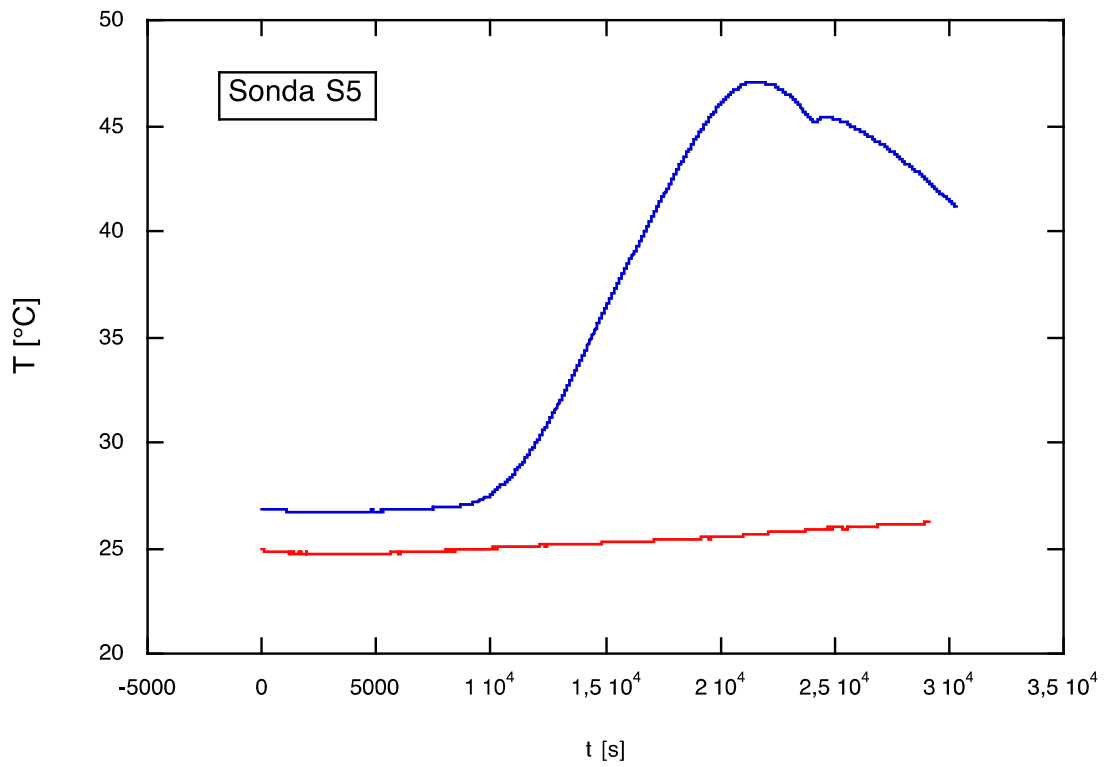


Fig. 53– Prova con tubo ricevitore da 8 mm, simulazione vapor chamber confronto fra le varie inclinazioni, sonda 5

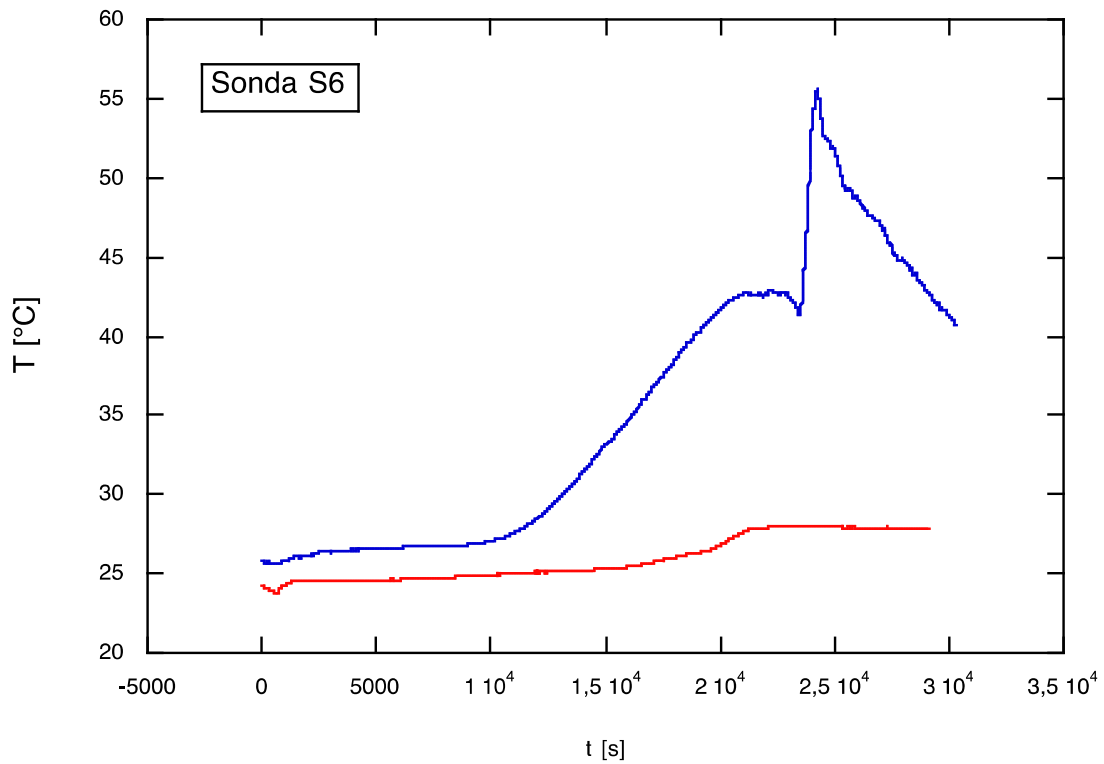


Fig. 54– Prova con tubo ricevitore da 8 mm, simulazione vapor chamber confronto fra le varie inclinazioni, sonda 6

Il cattivo funzionamento di questa sezione di prova, nonostante il fatto che la simulazione della vapor chamber in quest'ultimo caso esaminato sia molto approssimativa, ha fatto propendere verso un cambiamento nel tubo ricevitore ingrandendolo e portandolo a 10 mm. Questo anche in considerazione del fatto che tale tubo sia di maggior reperibilità sul mercato e quindi più economico per l'acquisto. Tutto il resto della sezione di prova rimane uguale al caso precedente e quindi la disposizione è la stessa della figura 36.

Sono state effettuate quindi delle nuove prove su questa nuova sezione di prova, cambiando anche la maniera di somministrare la potenza elettrica alla resistenza, infatti calcolando la superficie della banda assorbente e la potenza solare massima che si può avere si può arrivare ad affermare che la potenza che insiste sulla banda assorbente è di 130W. Quindi le prove sono state effettuate dando un gradino di potenza di 130W, come nel caso reale, per 3 ore.

Esaminando le figure 55-57 per ciascuna inclinazione si può affermare che il comportamento è simile al caso del tubo da 8 mm con la potenza distribuita su tutta la lunghezza del tubo ricevitore. La variazione delle temperature sulla lunghezza del tubo ricevitore ed anche nel tubo collettore indica un instaurarsi della circolazione naturale che rende il sistema in grado di funzionare. La temperatura nel tubo collettore arriva a valori tali che l'uso di detta acqua da parte di un possibile utilizzatore sia compatibile con la richiesta normale di acqua calda sanitaria.

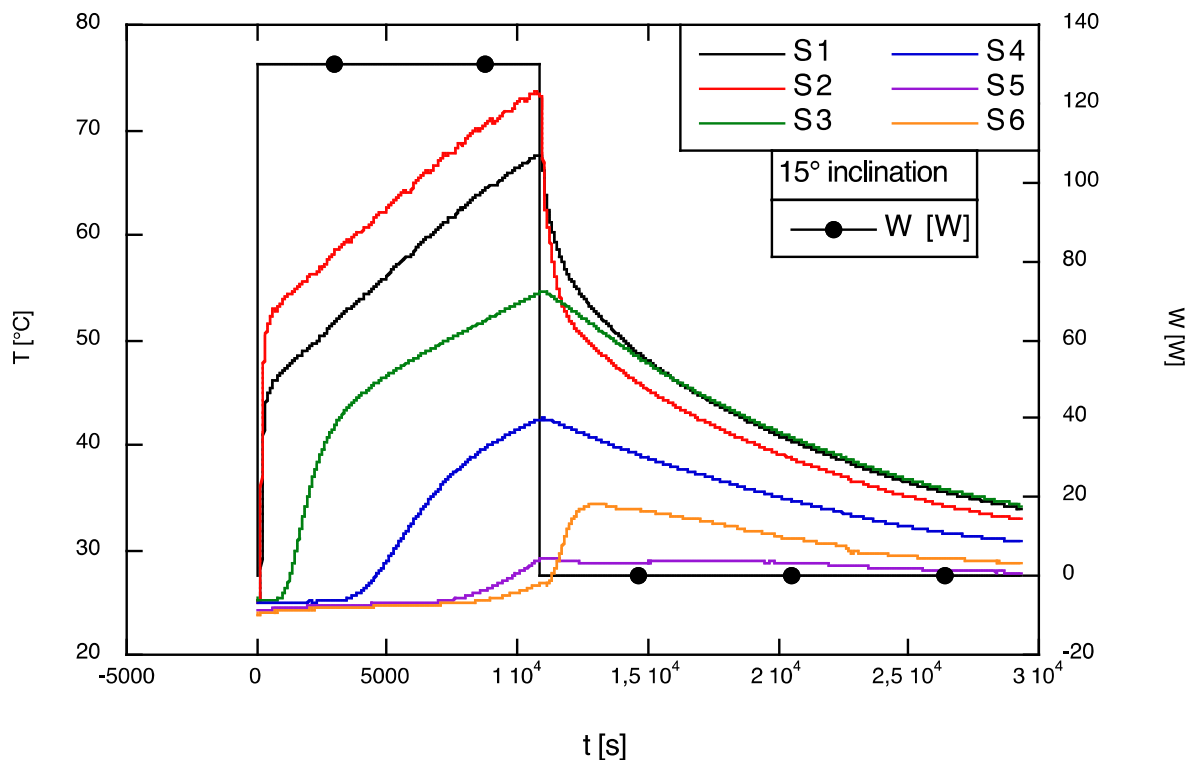


Fig. 55– Prova con tubo ricevitore da 10 mm, potenza su tutto il tubo, inclinazione di 15° .

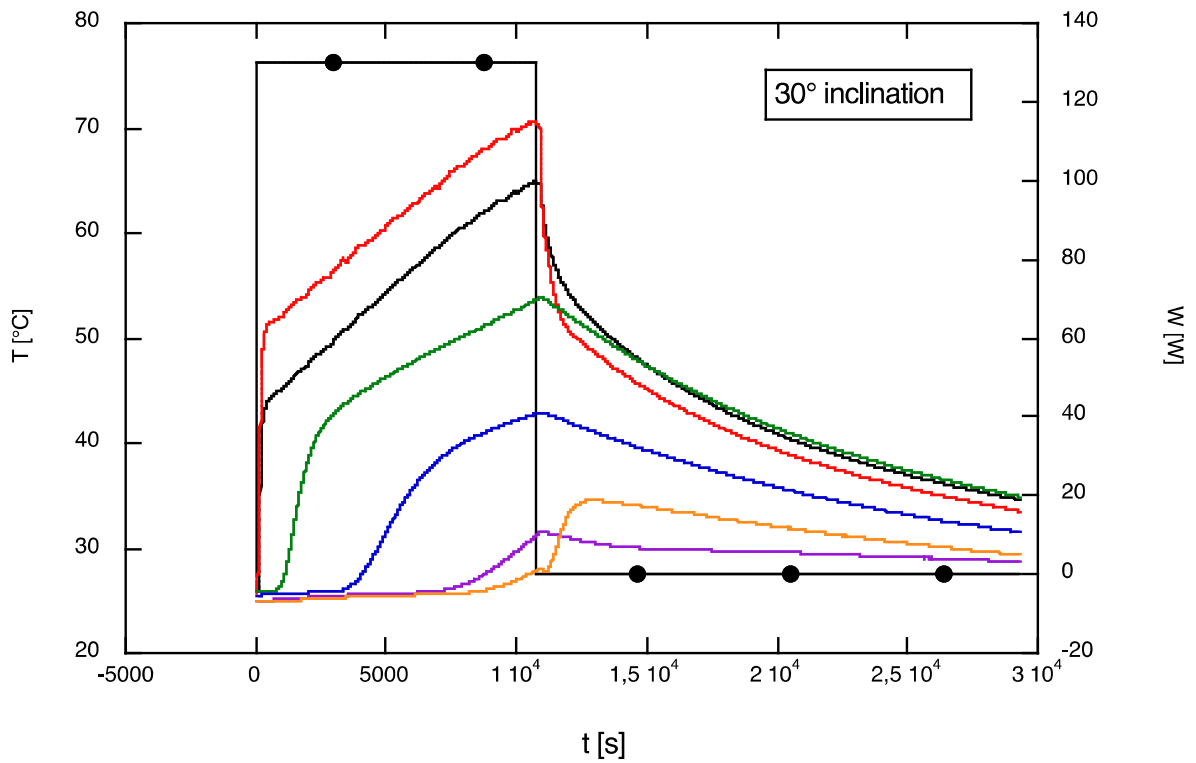


Fig. 56– Prova con tubo ricevitore da 10 mm, potenza su tutto il tubo, inclinazione di 30° .

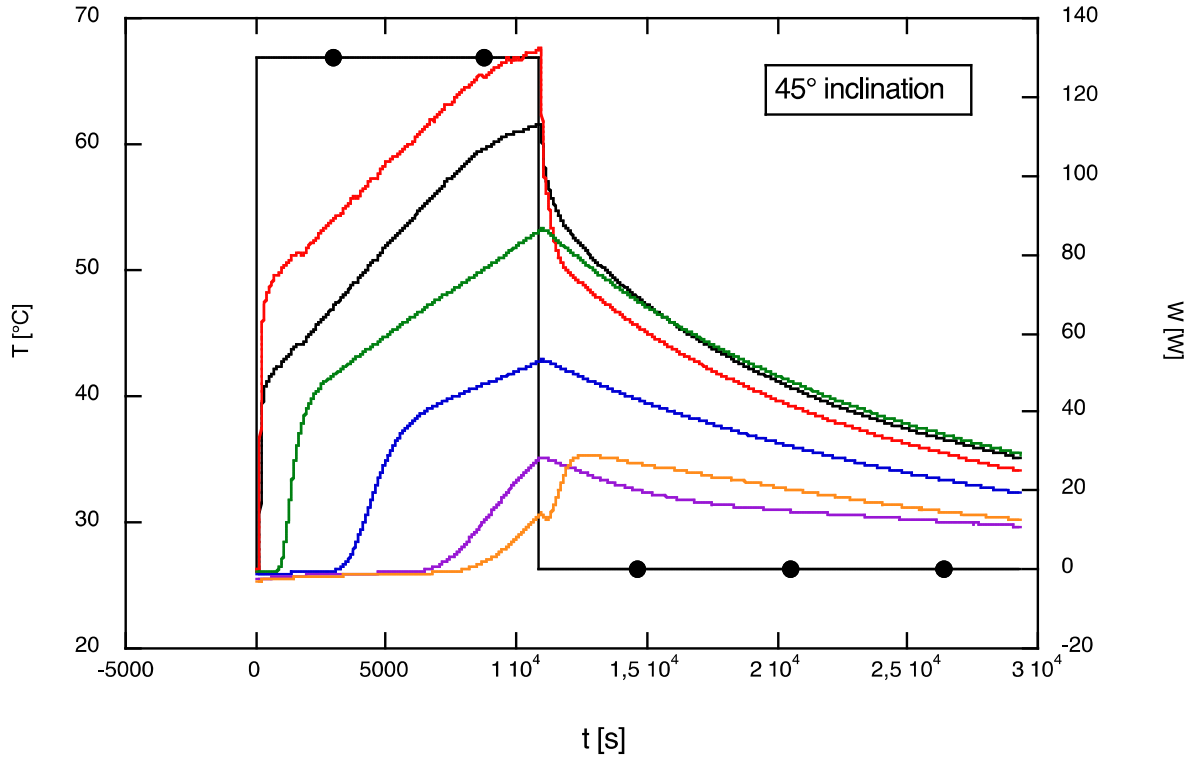


Fig. 57– Prova con tubo ricevitore da 10 mm, potenza su tutto il tubo, inclinazione di 45° .

Confrontando i risultati ottenuti in funzione dell'inclinazione rispetto all'orizzontale, le conclusioni sono simili a quelle ottenute con la sezione di prova da 8 mm sul tubo ricevitore. Nelle figure possiamo vedere

quanto affermato sopra. Nella parte alta del tubo ricevitore le temperature nel collettore meno inclinato sono più alte, questo comportamento, se pur meno accentuato nei valori, continua anche nella parte alta del tubo collettore. Nella parte centrale e nella parte bassa del collettore, l'andamento delle temperature si inverte, con il tubo più inclinato che presenta temperature più alte rispetto ai due meno inclinati. Questo andamento è presente anche nella parte più bassa del tubo ricevitore. Anche in questo caso la termocoppia è posta sotto la zona riscaldata, quindi valgono le stesse considerazioni fatte per il tubo ricevitore da 8 mm. Anche in questo caso quindi il tubo più inclinato è quello che meglio favorisce la circolazione naturale ed una migliore distribuzione della temperatura nel fluido presente.

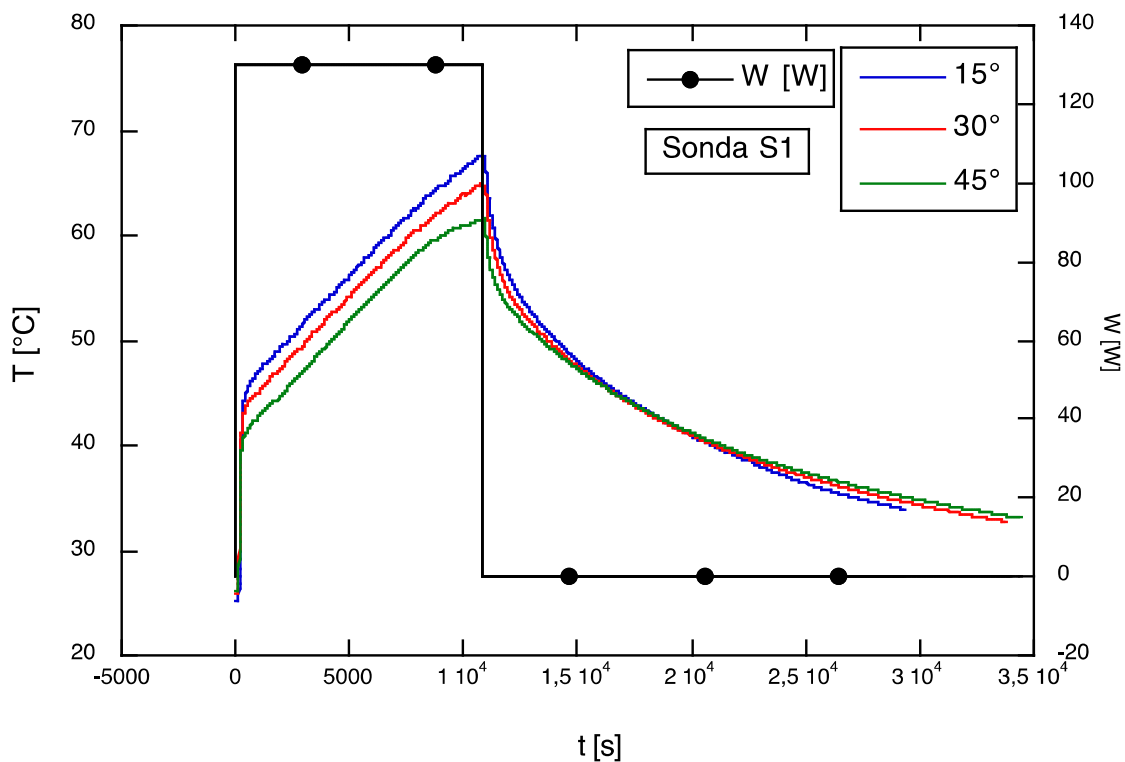


Fig. 58– Prova con tubo ricevitore da 10 mm, potenza su tutto il tubo, confronto fra le varie inclinazioni, sonda 1.

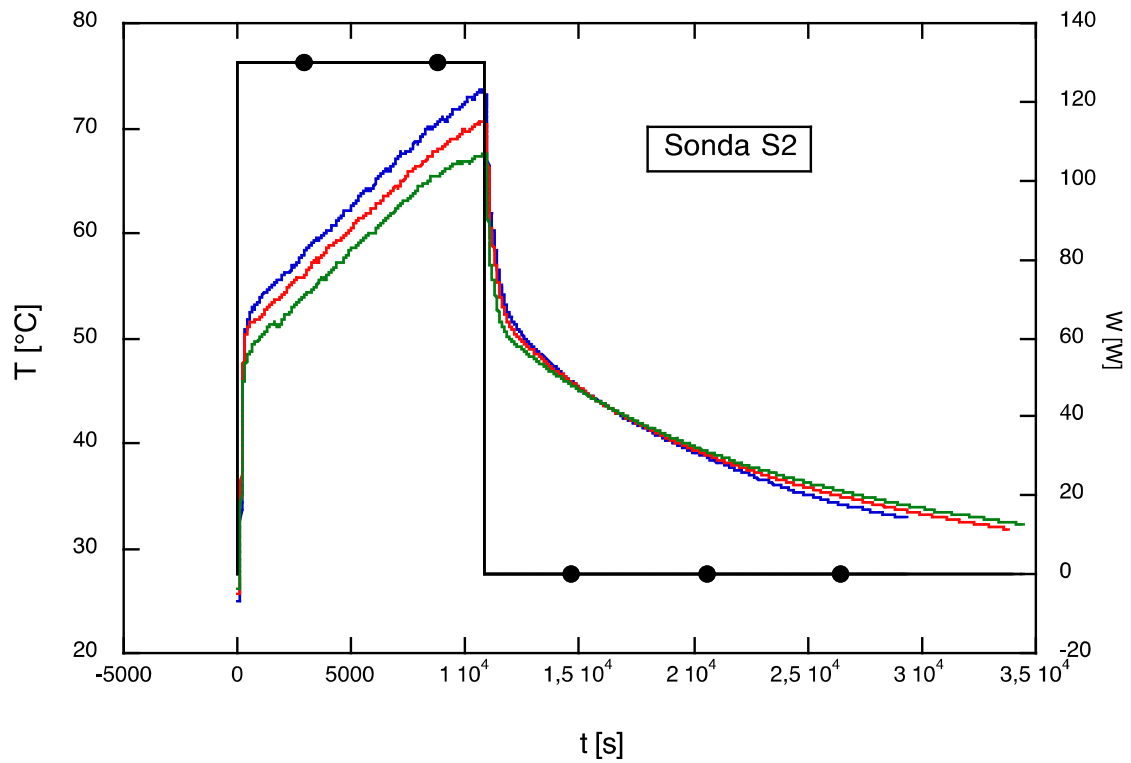


Fig. 59– Prova con tubo ricevitore da 10 mm, potenza su tutto il tubo, confronto fra le varie inclinazioni, sonda 2.

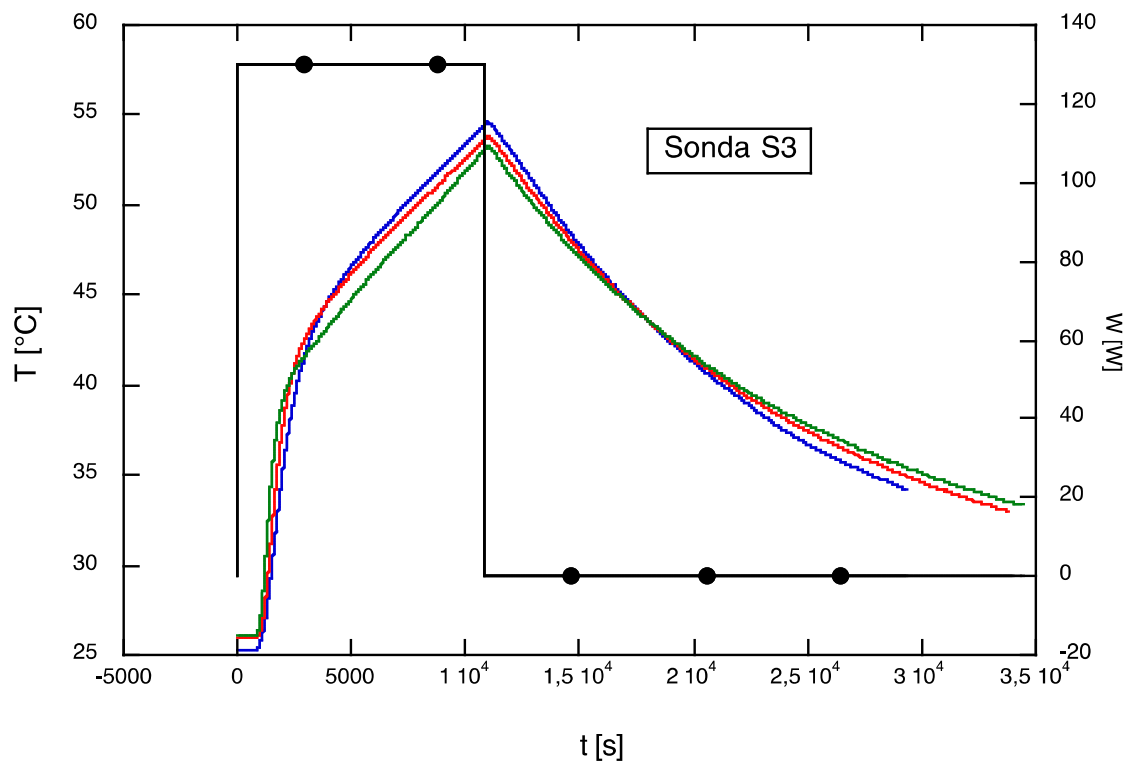


Fig. 60– Prova con tubo ricevitore da 10 mm, potenza su tutto il tubo, confronto fra le varie inclinazioni, sonda 3.

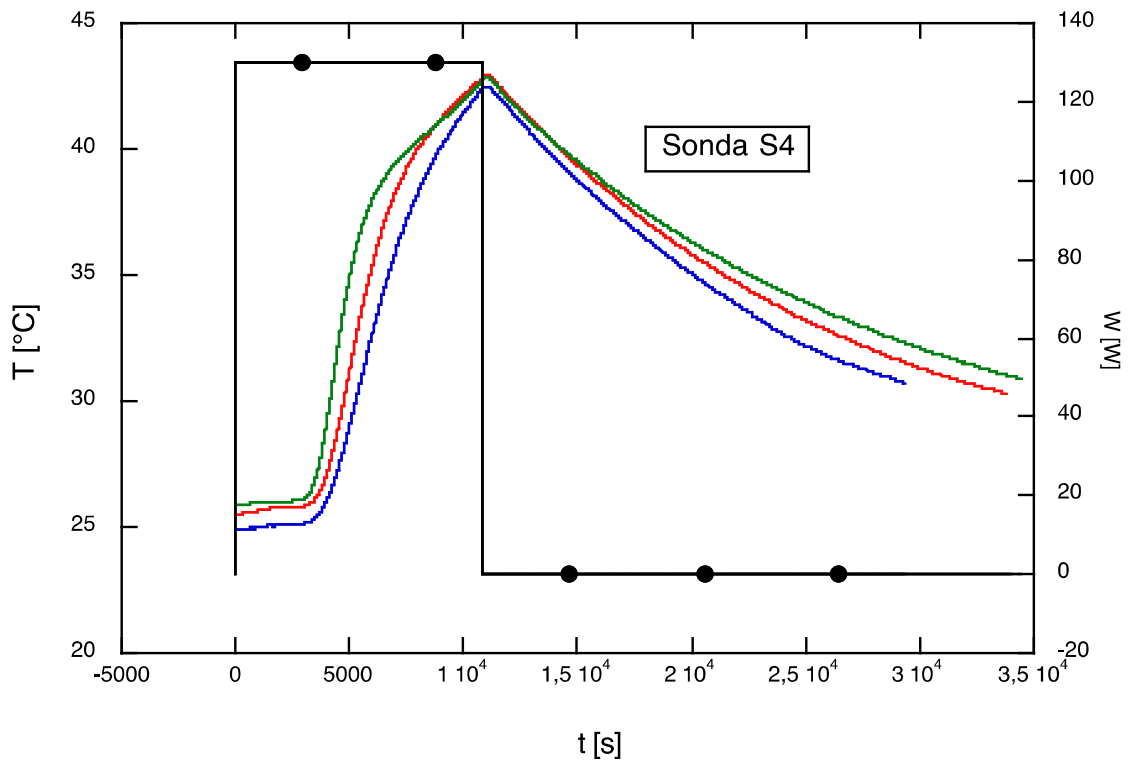


Fig. 61– Prova con tubo ricevitore da 10 mm, potenza su tutto il tubo, confronto fra le varie inclinazioni, sonda 4.

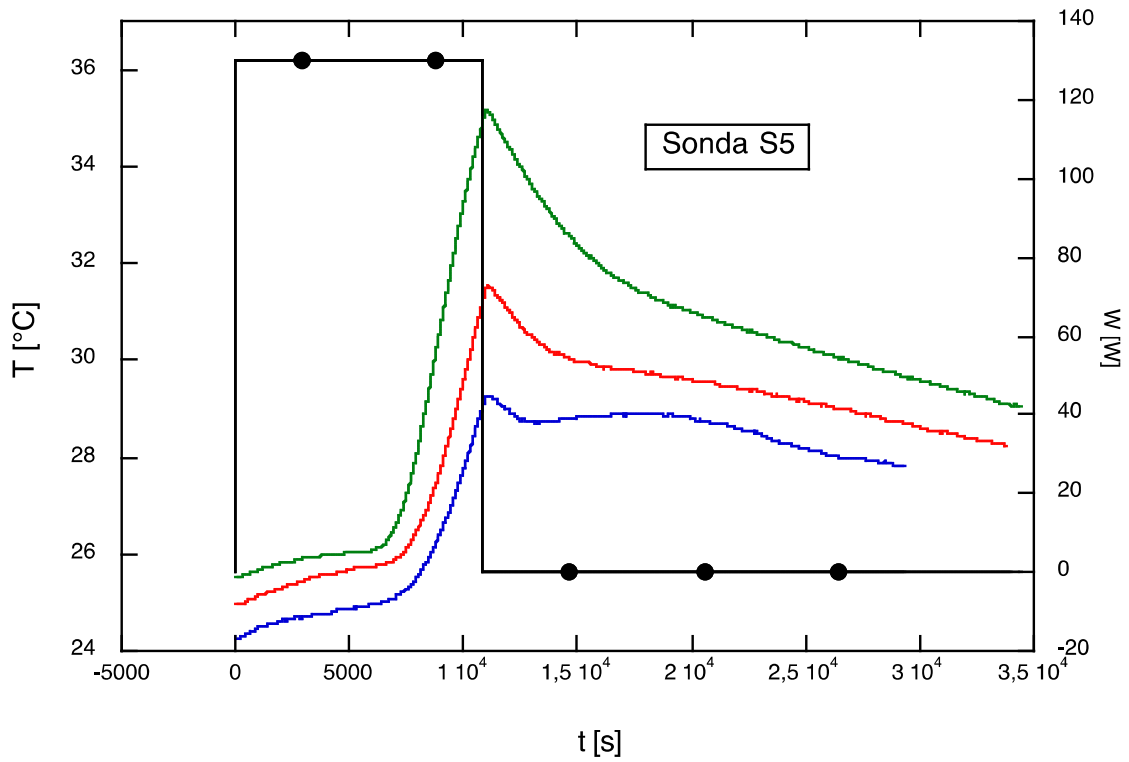


Fig. 62– Prova con tubo ricevitore da 10 mm, potenza su tutto il tubo, confronto fra le varie inclinazioni, sonda 5.

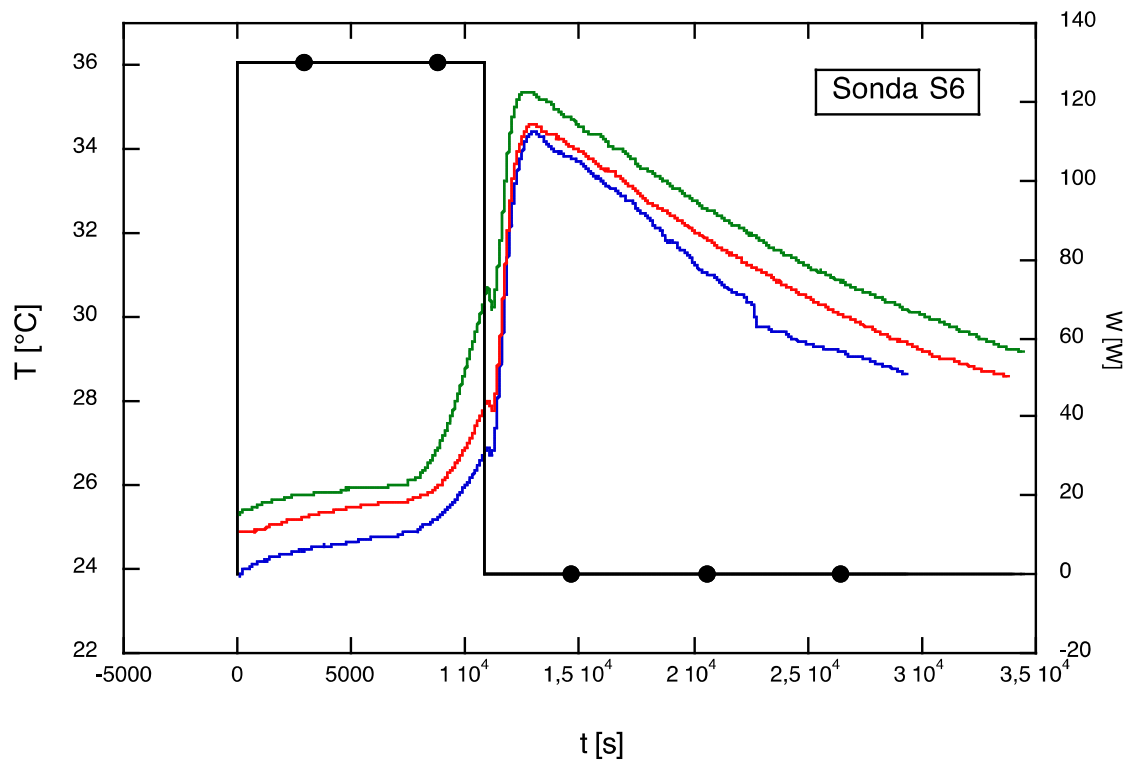


Fig. 63– Prova con tubo ricevitore da 10 mm, potenza su tutto il tubo, confronto fra le varie inclinazioni, sonda 6.

Per provare l'effetto della presenza della vapor chamber sul collettore è stata modificata nuovamente la sezione di prova, inserendo la banda assorbente con sotto il tubo ricevitore, caso molto più vicino al caso reale, e ponendo sopra di essa una striscia riscaldante, sempre per effetto Joule. Le foto di questo nuovo assemblaggio sono in figura 64 e 65. Per mettere le vapor chamber è stata realizzata una piastra che fissasse le due vapor chamber a contatto sia con la banda assorbente (zona evaporativa del tubo di calore) che il tubo ricevitore (zona condensante dell'heat pipe) figura 66. Il risultato si può vedere nelle figure 67 e 68 in cui si vedono le due vapor chambers strette fra la banda assorbente e la piastra di supporto con al centro, fra le due, il tubo ricevitore. La disposizione delle termocoppie non ha subito variazioni rispetto alle precedenti configurazioni, il tubo ricevitore è sempre da 10 mm, mentre la potenza viene fornita sempre secondo la modalità studiata per la sezione di prova precedente: gradino di potenza al tempo zero per circa tre ore e poi ritorno a zero potenza con un gradino inverso.



Fig. 64 – Nuova disposizione del riscaldatore per le prove con vapor chamber



Fig. 65 – Nuova disposizione del riscaldatore per le prove con vapor chamber, particolare.



Fig. 66 – Piastra usata per il fissaggio della vapor chamber

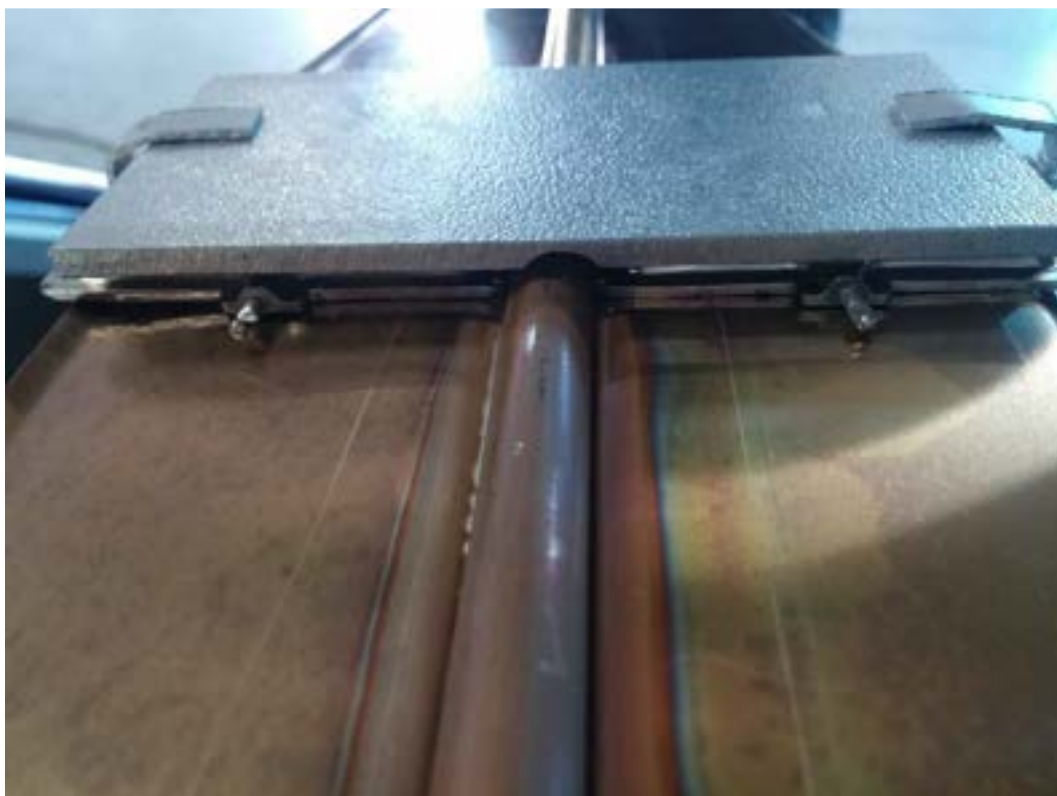


Fig. 67 – Disposizione della vapor chamber



Fig. 68 – Veduta della disposizione della vapor chamber

Sono state effettuate due prove simili: la prima in cui le due vapor chambers non sono state posizionate la seconda invece in cui le vapor chambers sono presenti. Tutti gli altri parametri sono rimasti invariati.

I risultati sono riportati nelle figure 69 e 70. Si può vedere, in tutti e due i casi che la salita delle temperature è più rapida in questa disposizione per poi mantenersi costante, con moltissime oscillazioni, fino al momento in cui viene tolta potenza. Un confronto preciso non può essere fatto in quanto le due disposizioni sono troppo diverse ed anche l'isolamento non è lo stesso. Venendo al confronto fra sezione di prova con e senza vapor chamber riportiamo le figure da 71 a 76. Analizzando queste figure si può vedere come la presenza delle vapor chambers aumenti la temperatura nelle due sonde sulla parte superiore del tubo ricevitore, pur con qualche differenza. Le grosse differenze sono negli andamenti delle temperature nelle altre quattro termocoppie. Mentre nella prova senza le vapor chambers le temperature nel collettore hanno un incremento la presenza delle vapor chambers sembra bloccare questi aumenti, questo nonostante le due prove sono state effettuate con una inclinazione di  $45^\circ$  che era quella che meglio favoriva la circolazione naturale. Tutto questo fa concludere che la presenza delle vapor chambers favorisce lo scambio termico fra banda assorbente e tubo ricevitore, ma frena la circolazione naturale all'interno del collettore.

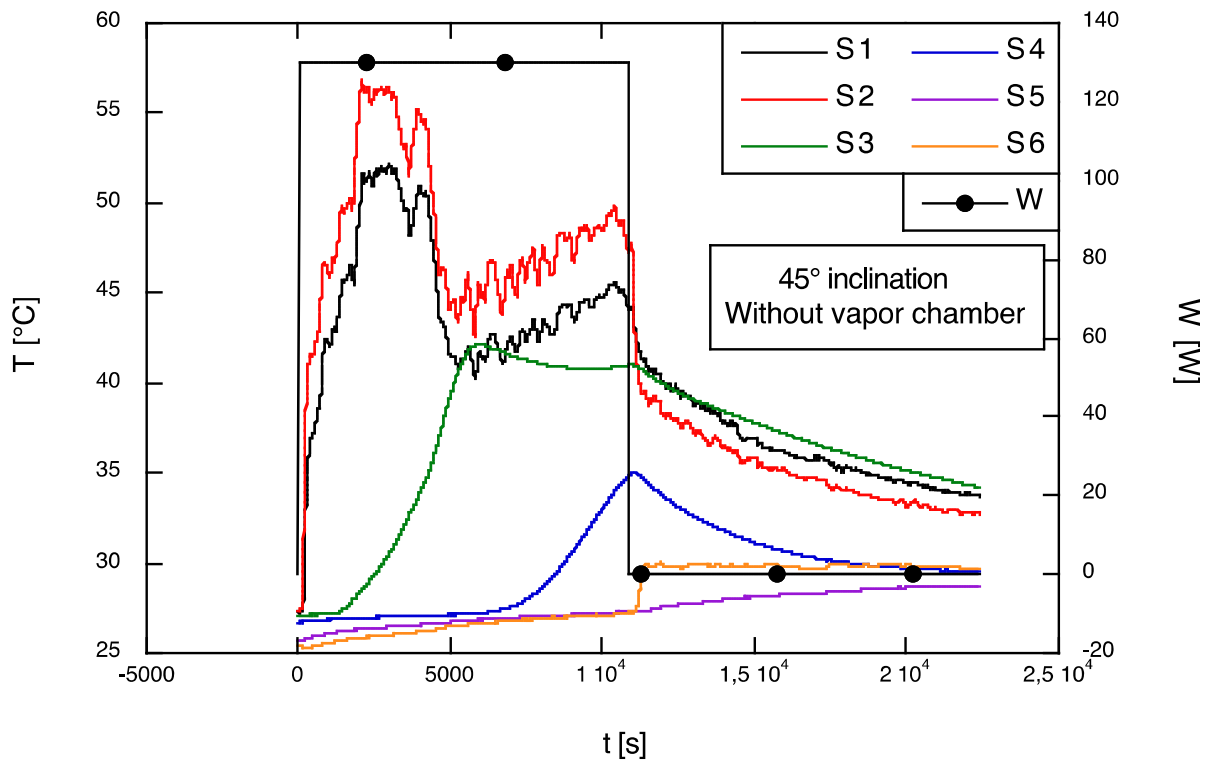


Fig. 69 – Prova con la nuova configurazione senza vapor chamber

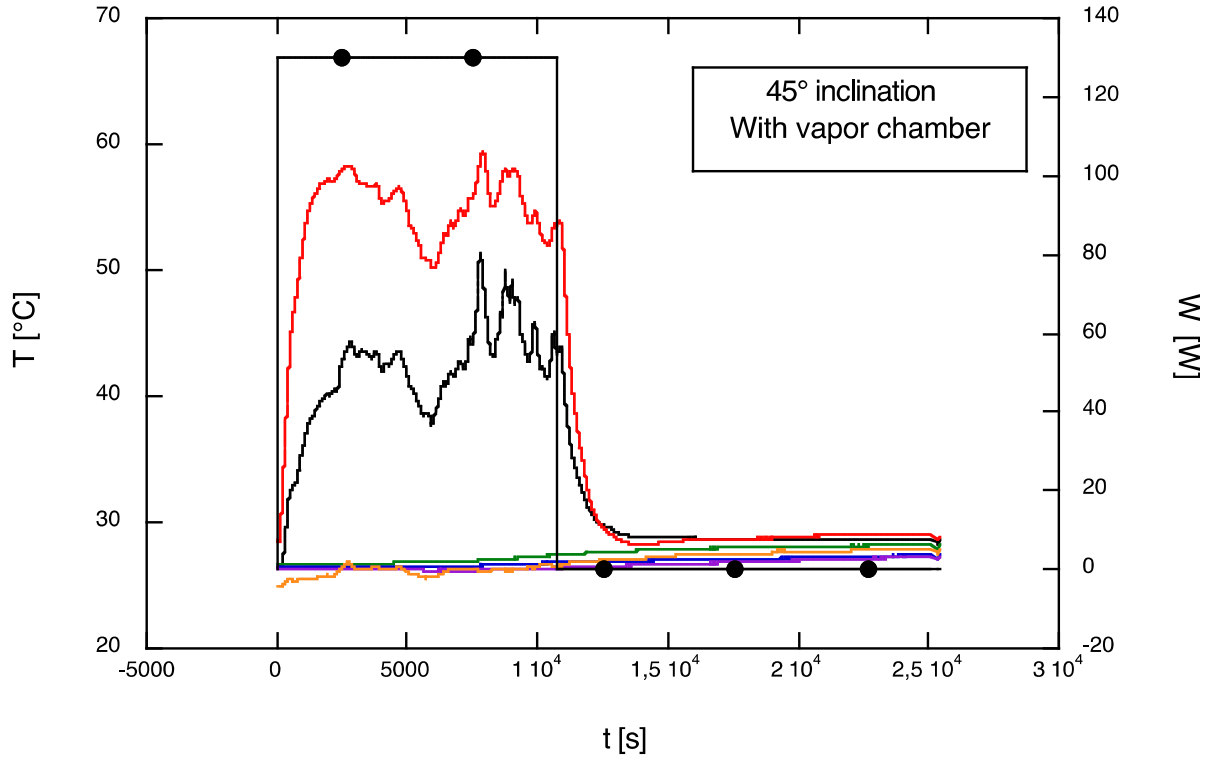


Fig. 70 – Prova con la nuova configurazione con vapor chamber

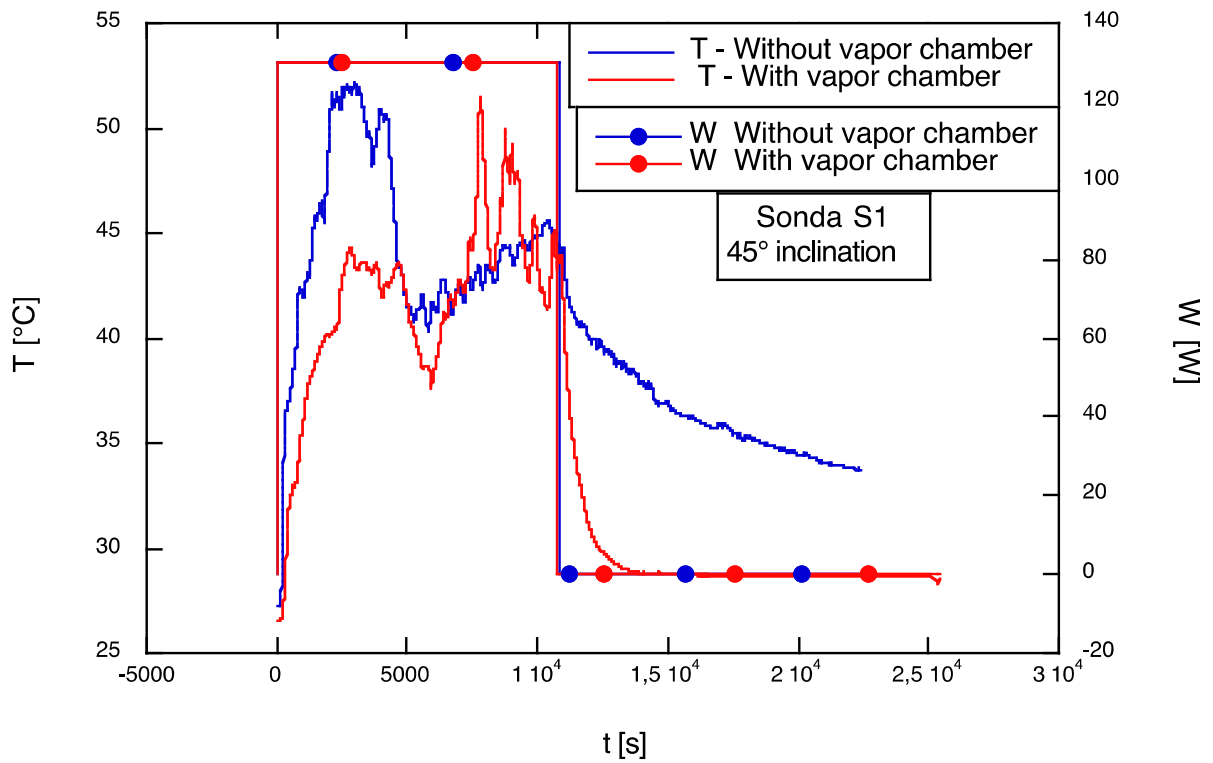


Fig. 71 – Confronto fra sezione di prova con e senza vapor chamber. Sonda 1

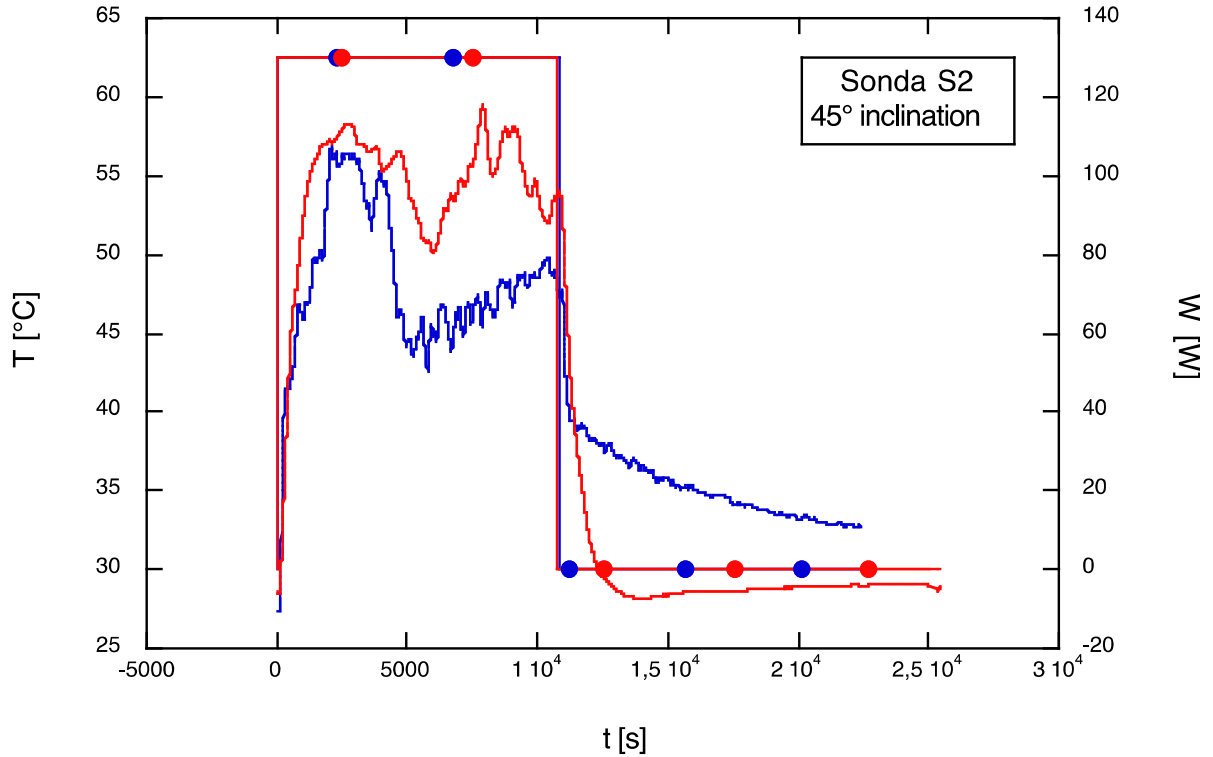


Fig. 72 – Confronto fra sezione di prova con e senza vapor chamber. Sonda 2

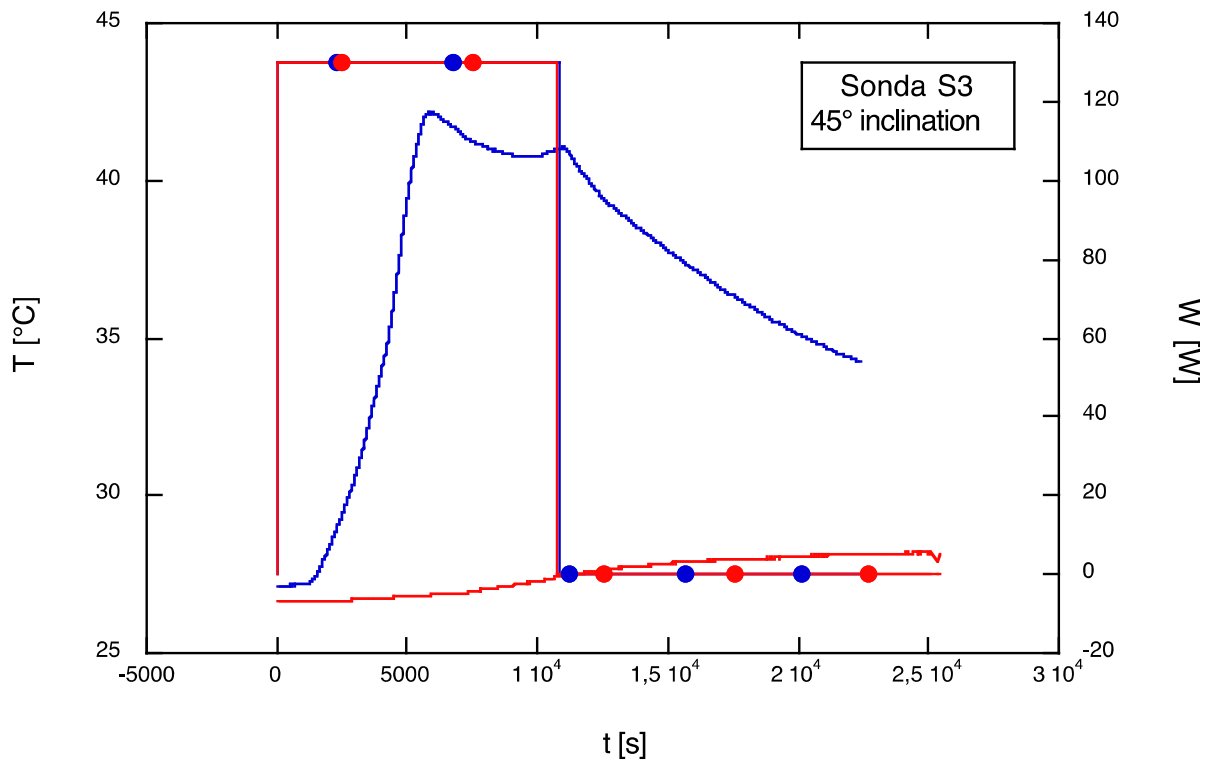


Fig. 73 – Confronto fra sezione di prova con e senza vapor chamber. Sonda 3

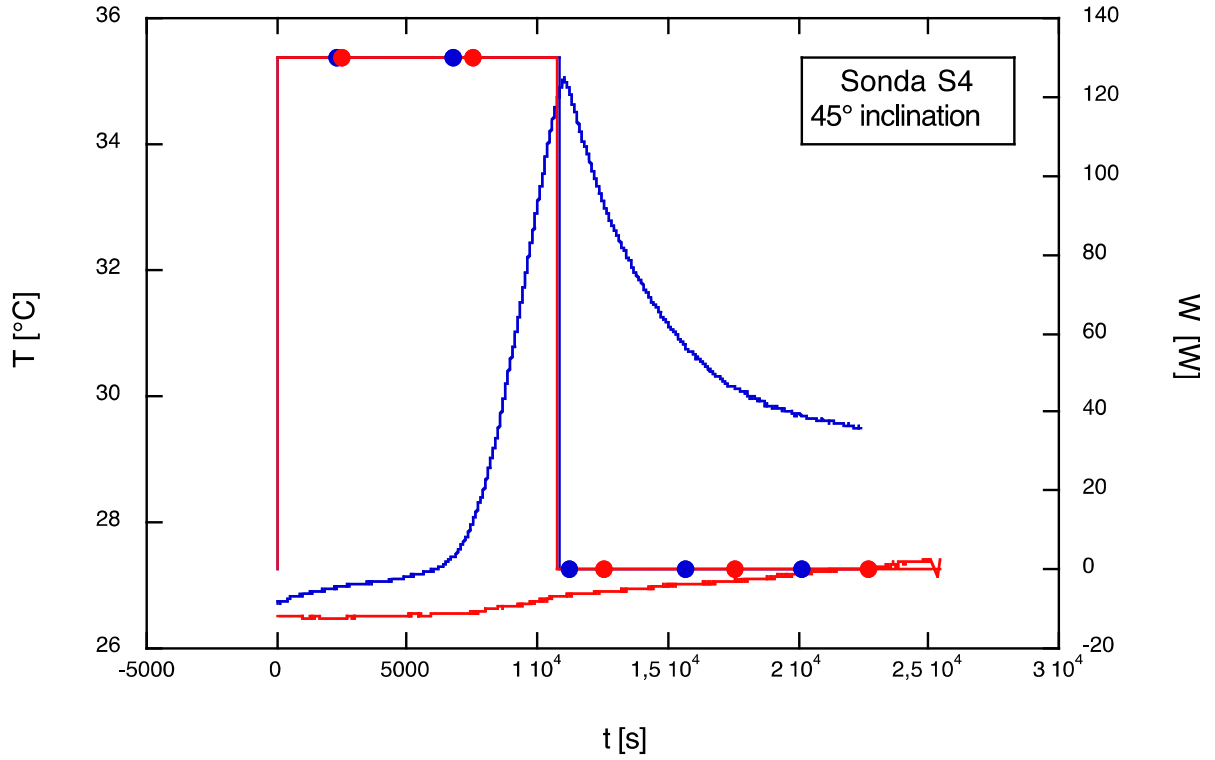


Fig. 74 – Confronto fra sezione di prova con e senza vapor chamber. Sonda 4

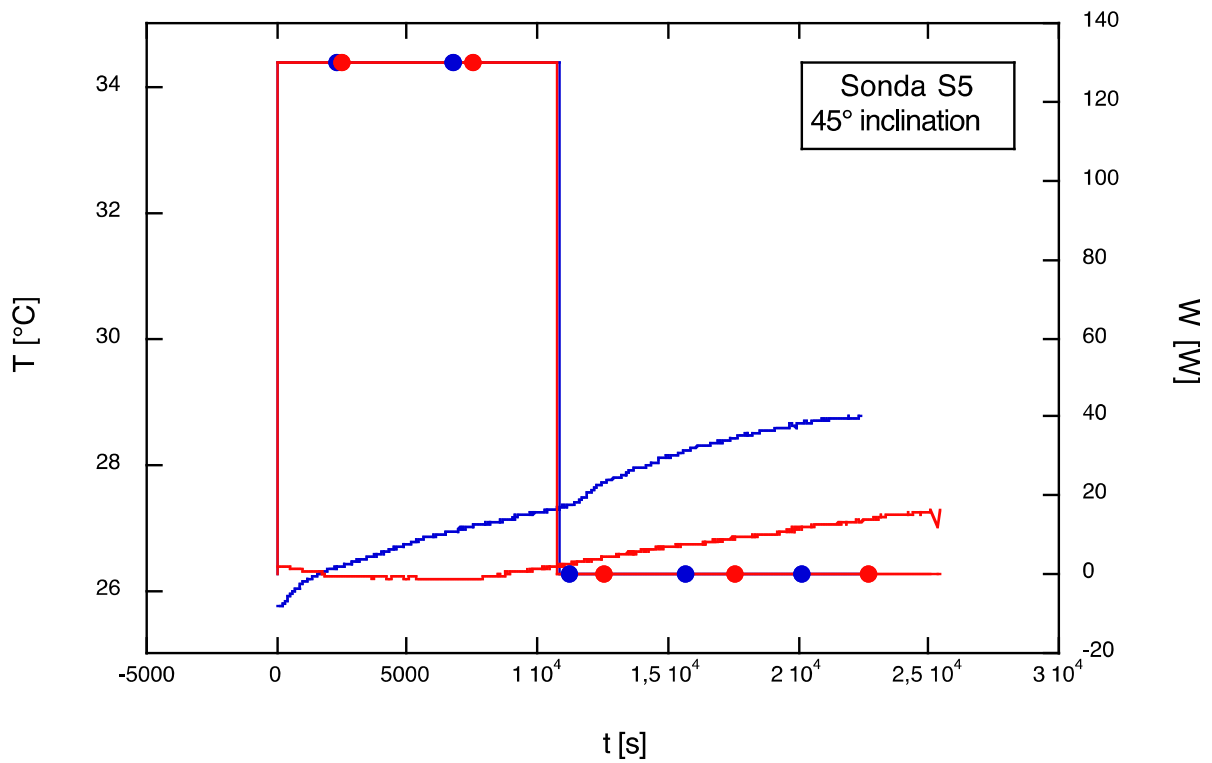


Fig. 75 – Confronto fra sezione di prova con e senza vapor chamber. Sonda 5

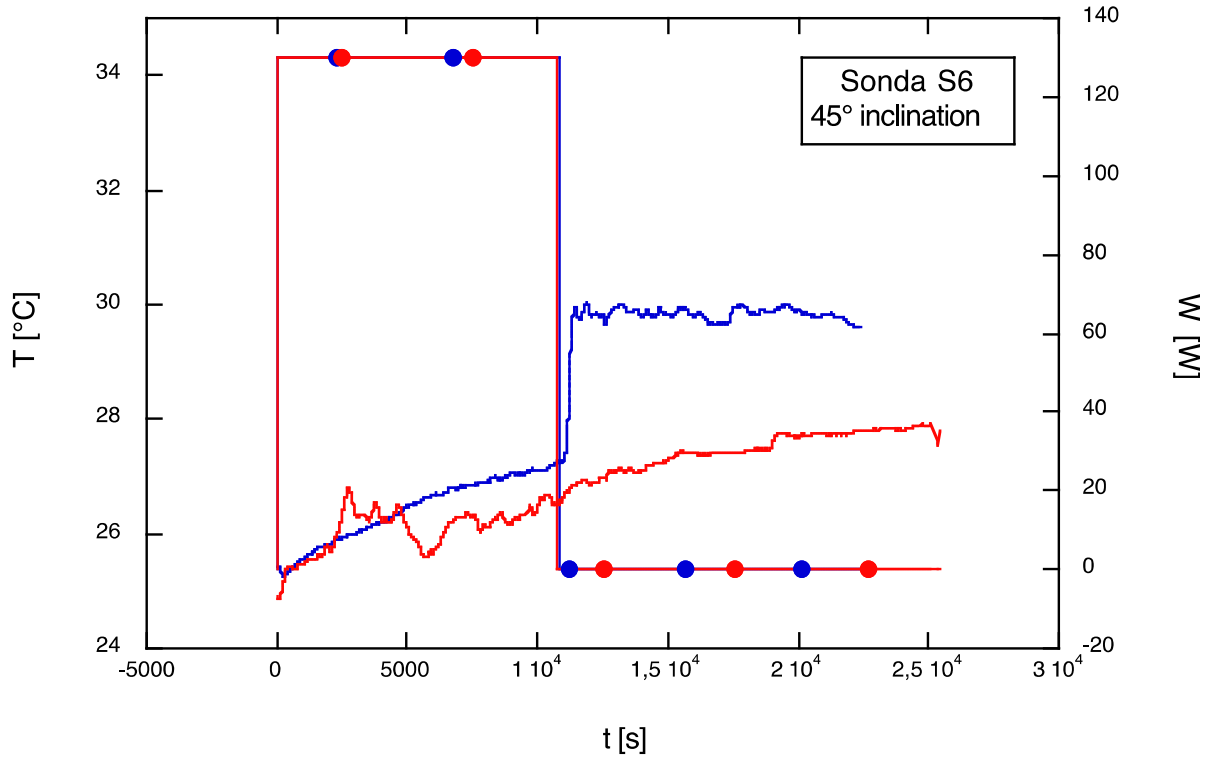


Fig. 76 – Confronto fra sezione di prova con e senza vapor chamber. Sonda 6

Vista la scarsità di informazioni fornita da questa prova è stato deciso di effettuare delle nuove prove aumentando la coibentazione, in quanto si crede che le oscillazioni presenti siano dovute ad uno

scarso isolamento del sistema unito ad un disaccoppiamento striscia scaldante e banda assorbente. La vapor chamber è stata posizionata, quando presente, all'altezza della sonda S2, mentre l'inclinazione del sistema è di 45° rispetto all'orizzontale

Sono state quindi effettuate nuove prove su tre diverse configurazioni di isolamento. Per completezza riportiamo anche la prova già vista in precedenza chiamandola Test 0. Le condizioni di isolamento sono quindi queste:

Test 0: definiamo in questo modo la prova fatta e già descritta nel lavoro. In questo caso tutto il sistema è stato isolato con neoprene spessore 1 mm

Test 1: la prova è stata realizzata con un isolamento in neoprene da 8 mm sopra la striscia senza la vapor chamber, poi è nelle stesse condizioni è stata fatta una prova inserendo la vapor chamber ed è stato posto anche dell'isolamento sotto la vapor chamber

Test 2: la prova è stata realizzata con un isolamento in neoprene da 24 mm sopra la striscia senza la vapor chamber poi è nelle stesse condizioni è stata fatta una prova inserendo la vapor chamber ed è stato posto anche dell'isolamento sotto la vapor chamber.

Test 3: la prova è stata realizzata con un isolamento in neoprene da 24 mm sopra la striscia e anche sotto, prova realizzata solo senza la vapor chamber.

Nella figura 77 riportiamo la disposizione delle termocoppie, anche se non è stata variata, per uniformità, rispetto alle prove precedenti. Invece in figura 78 viene illustrato il modo in cui le vapor chambers, quando presenti, sono state fissate al sistema

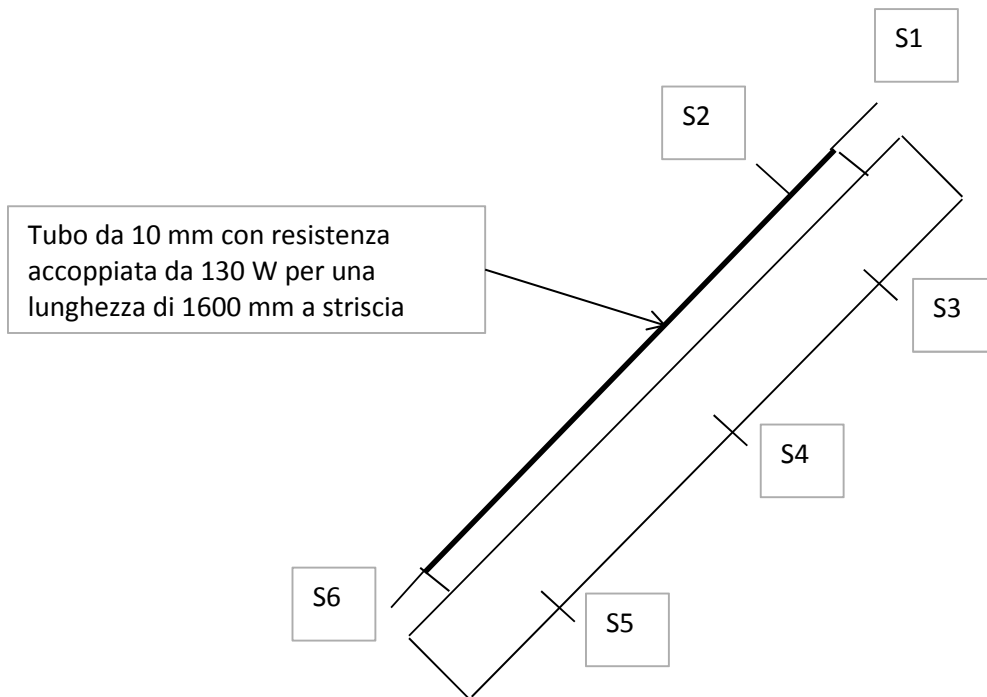


Fig. 77 – Disposizione delle termocoppie e metodo di riscaldamento scelto.

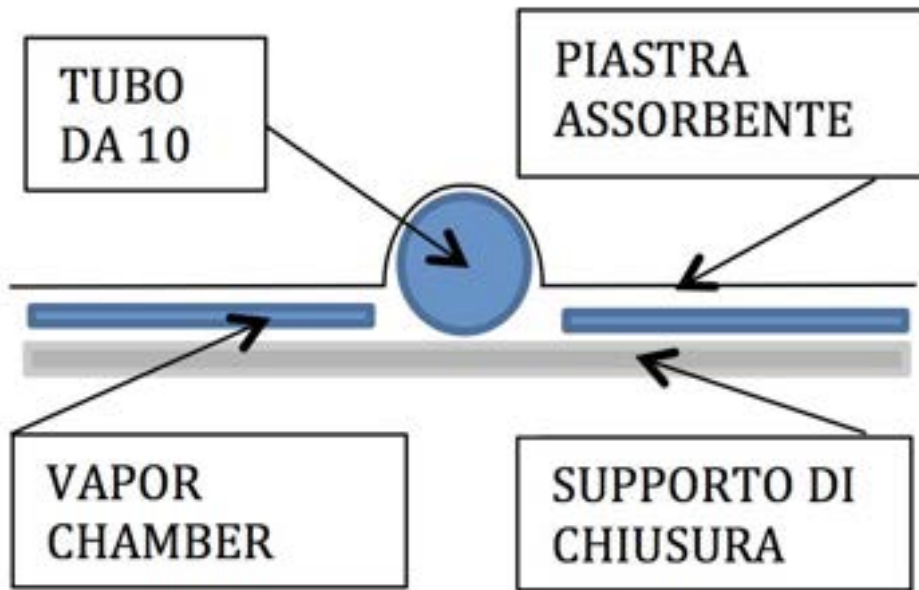


Fig. 78 – Schema del sistema usato per fissare la vapor chamber alla piastra assorbente.

Passando ad illustrare i risultati riportiamo le figure 79-83 in cui vengono riportati gli andamenti delle temperature misurate dalle sei termocoppie in tutte le cinque nuove prove effettuate.

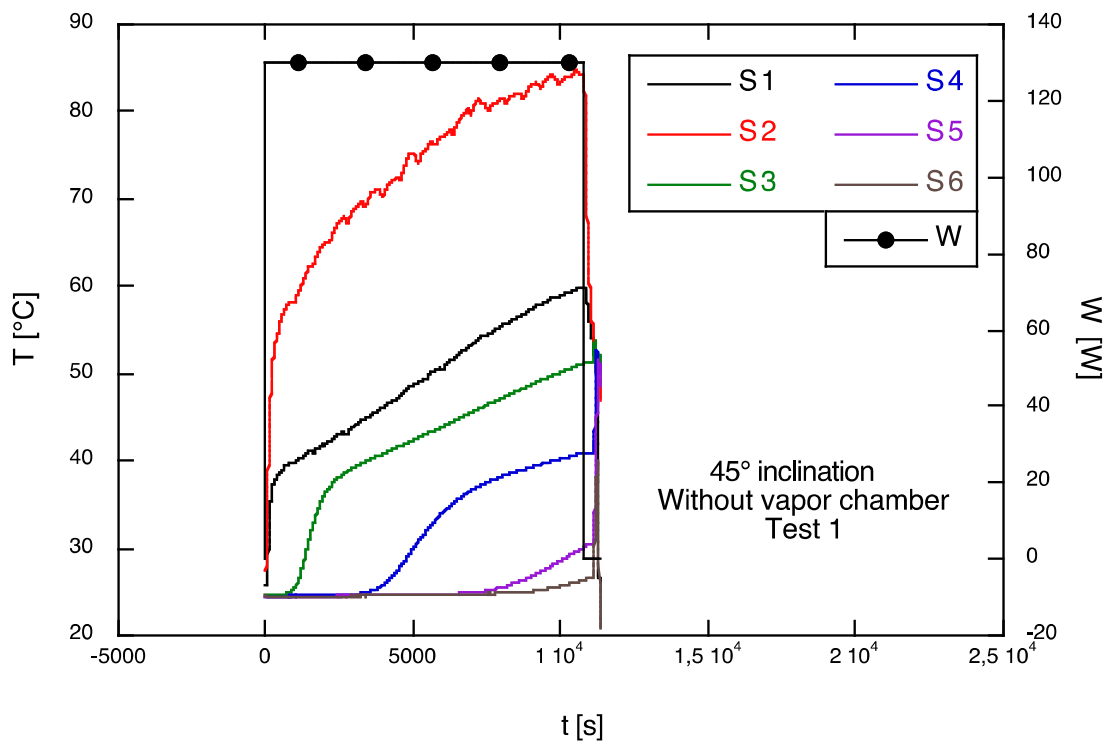


Fig. 79 – Andamento delle temperature nel Test 1, senza vapor chamber.

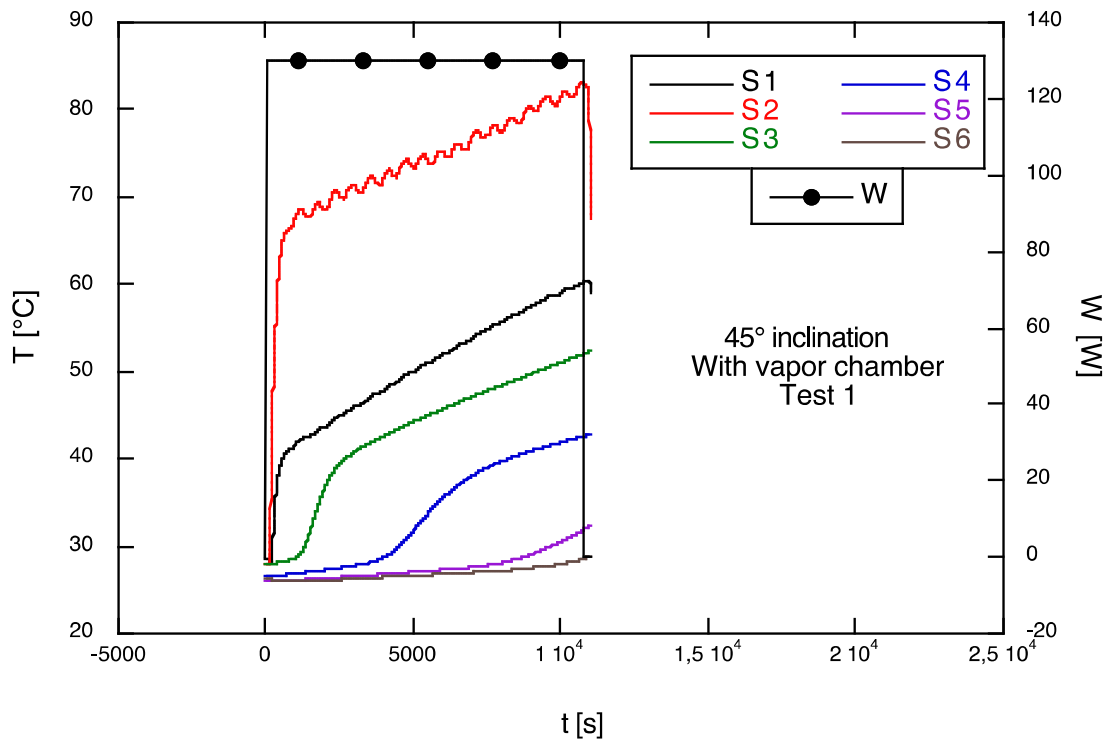


Fig. 80 - Andamento delle temperature nel Test 1, con vapor chamber.

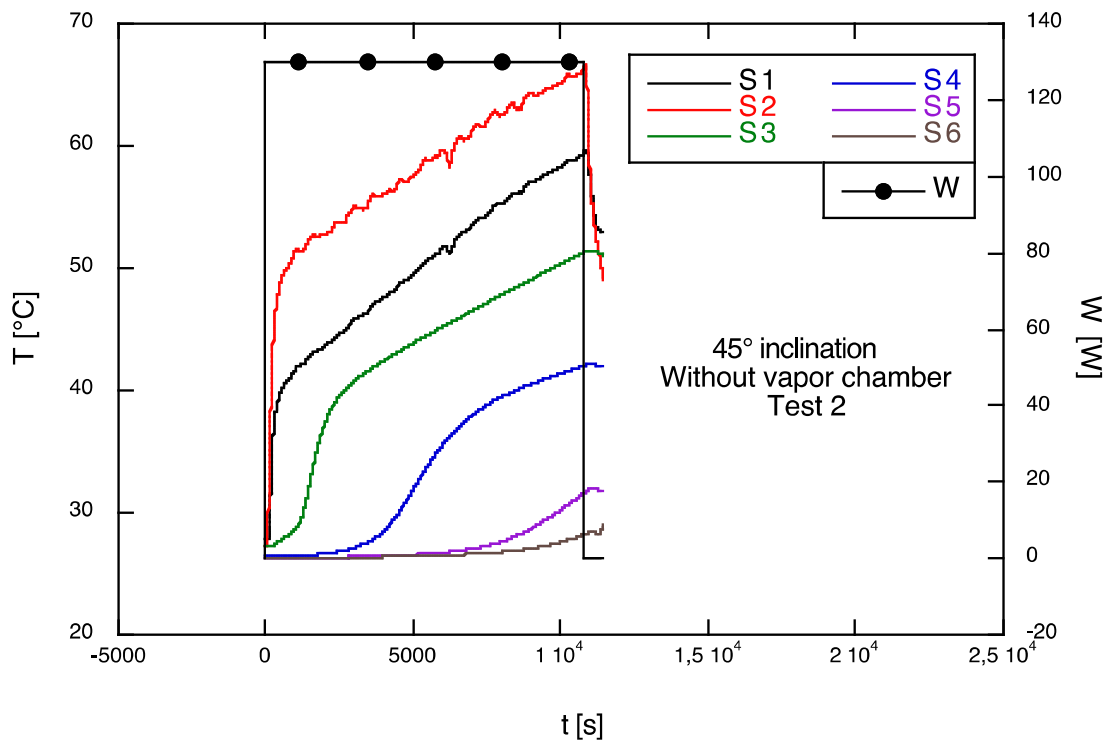


Fig. 81 - Andamento delle temperature nel Test 2, senza vapor chamber.

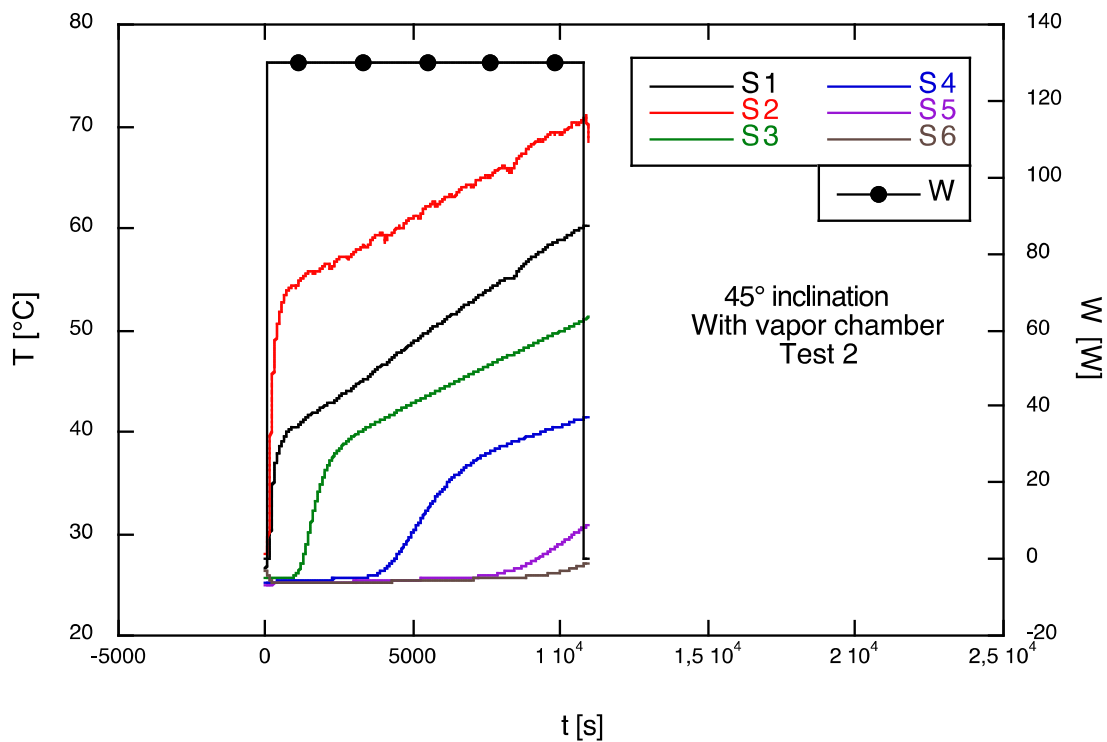


Fig. 82 - Andamento delle temperature nel Test 2, con vapor chamber.

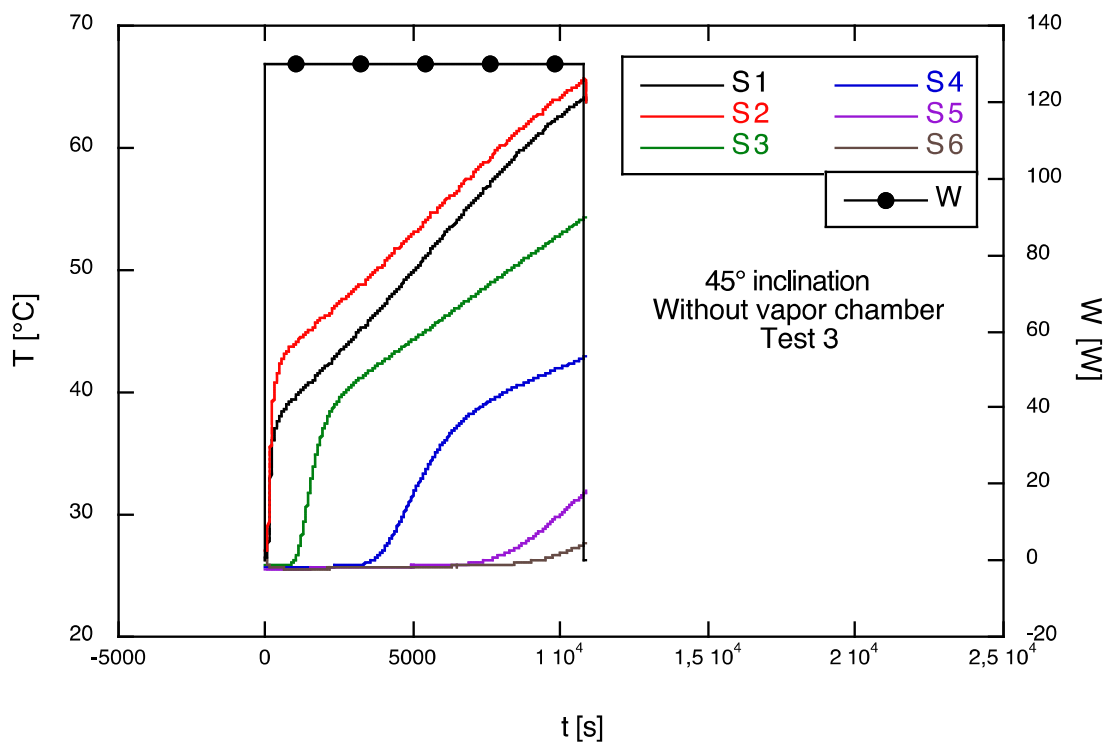


Fig. 83 - Andamento delle temperature nel Test 3, senza vapor chamber.

Riportiamo adesso il confronto fra i vari sistemi di isolamento. Per semplificare abbiamo riportato in ogni grafico solo due termocoppie dividendo il grafico totale del confronto in tre distinti grafici. Quindi riassumendo tutto e riportato nelle figure 84-89

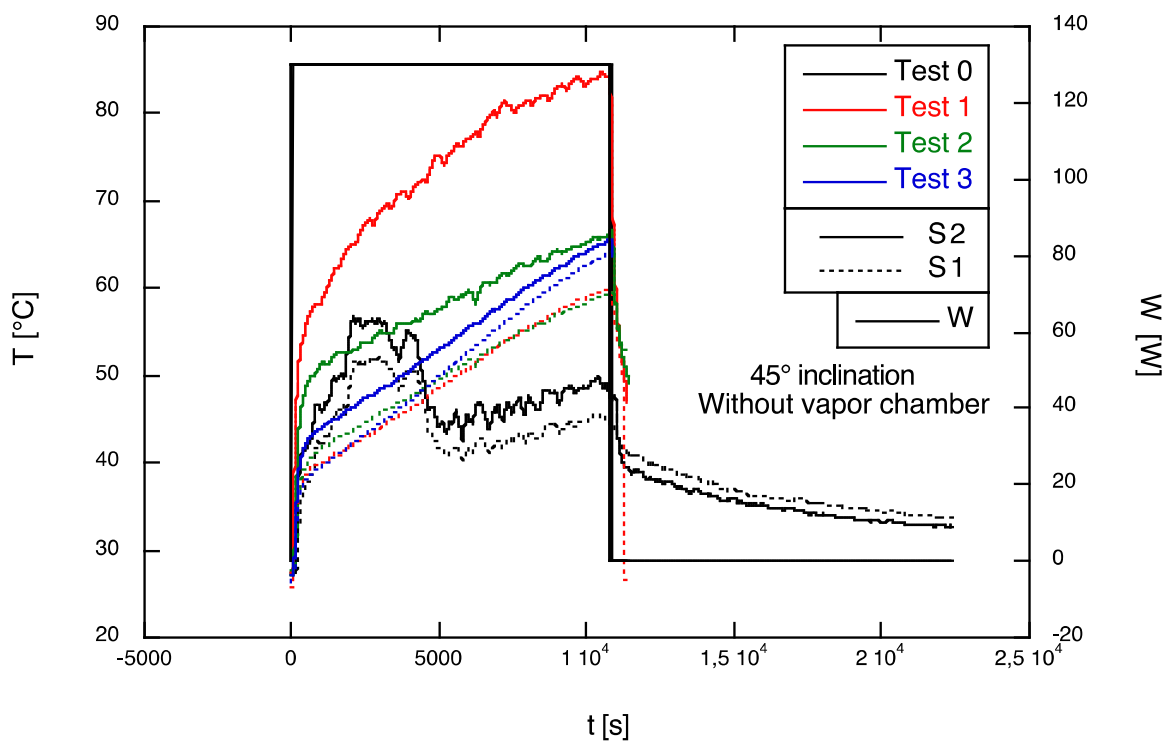


Fig. 84 – Confronto fra le temperature rilevate dalle sonde 1 e 2 nei vari test, senza la vapor chamber.

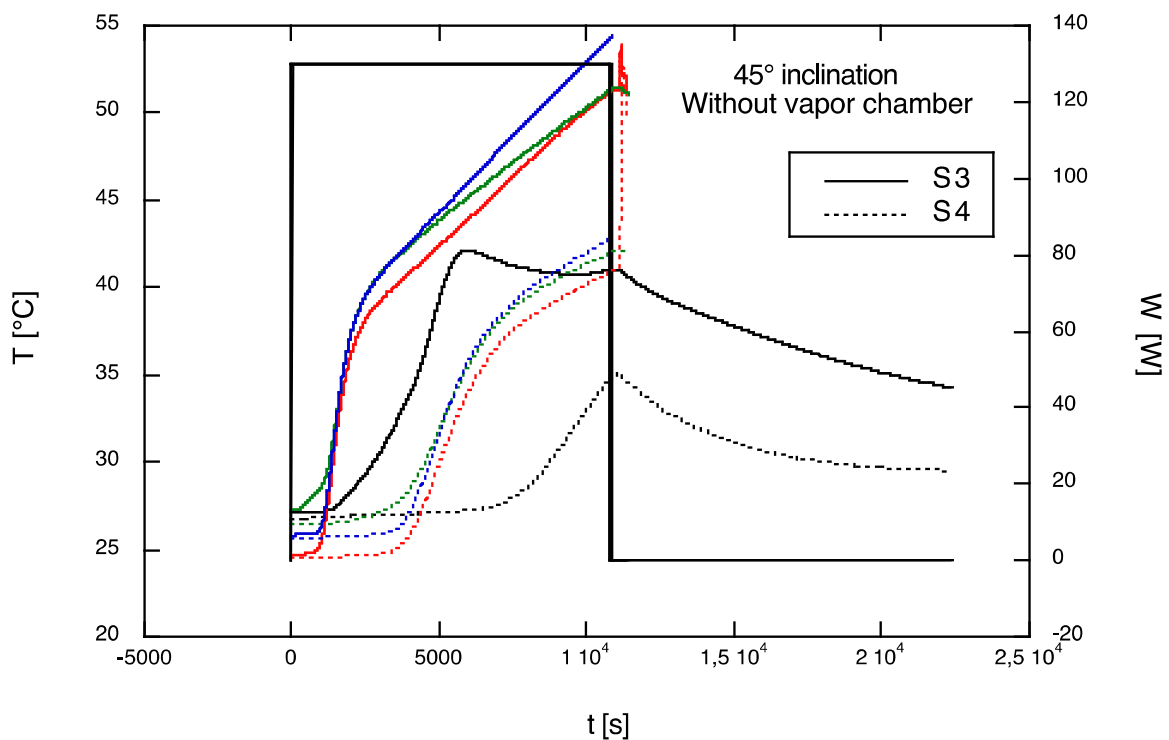


Fig. 85 – Confronto fra le temperature rilevate dalle sonde 3 e 4 nei vari test, senza la vapor chamber.

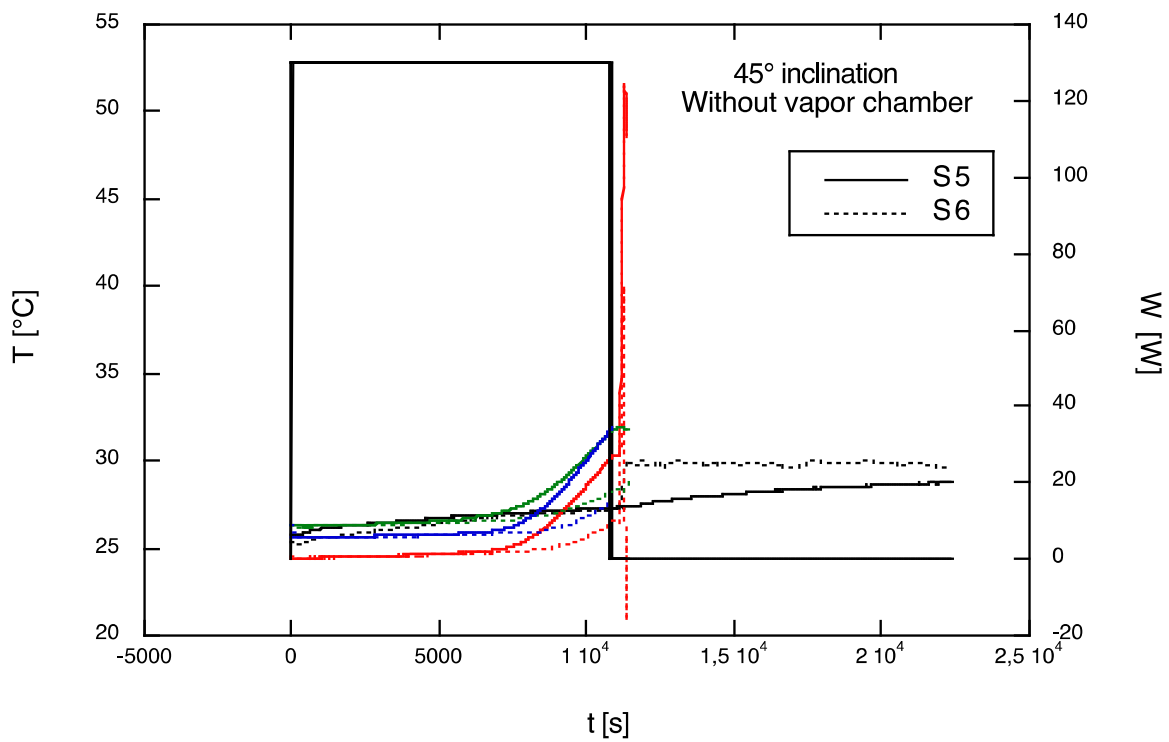


Fig. 86 – Confronto fra le temperature rilevate dalle sonde 5 e 6 nei vari test, senza la vapor chamber.

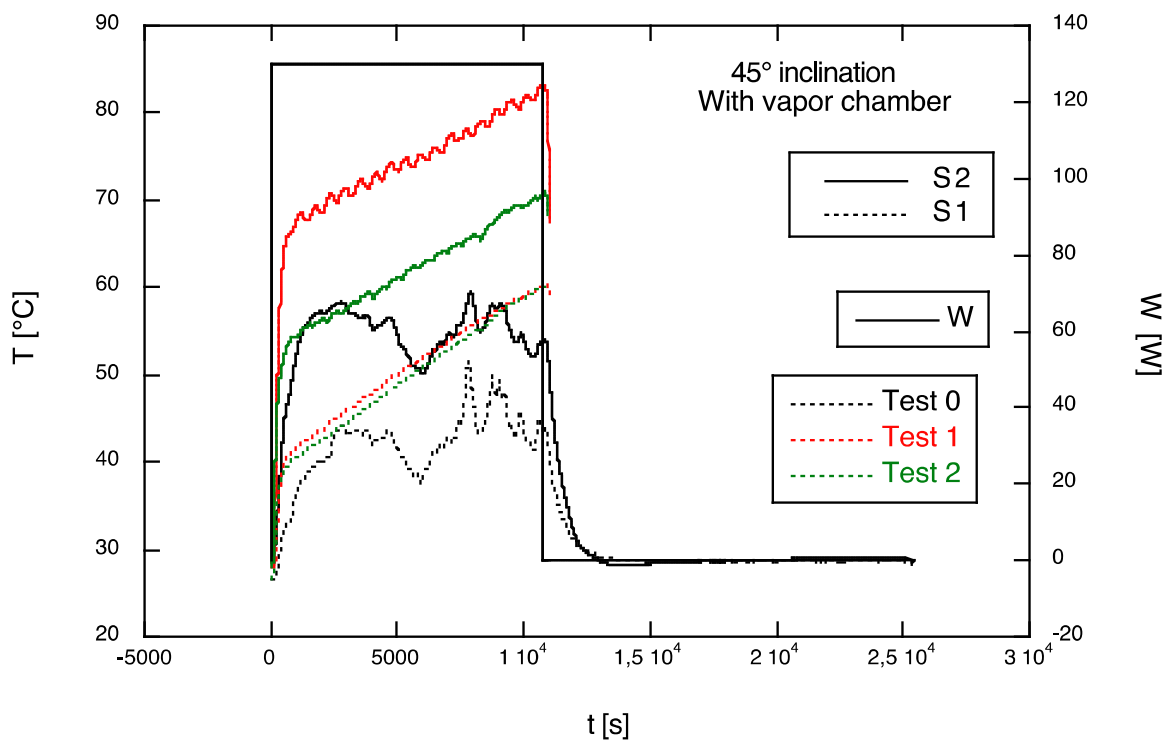


Fig. 87 – Confronto fra le temperature rilevate dalle sonde 1 e 2 nei vari test, con la vapor chamber.

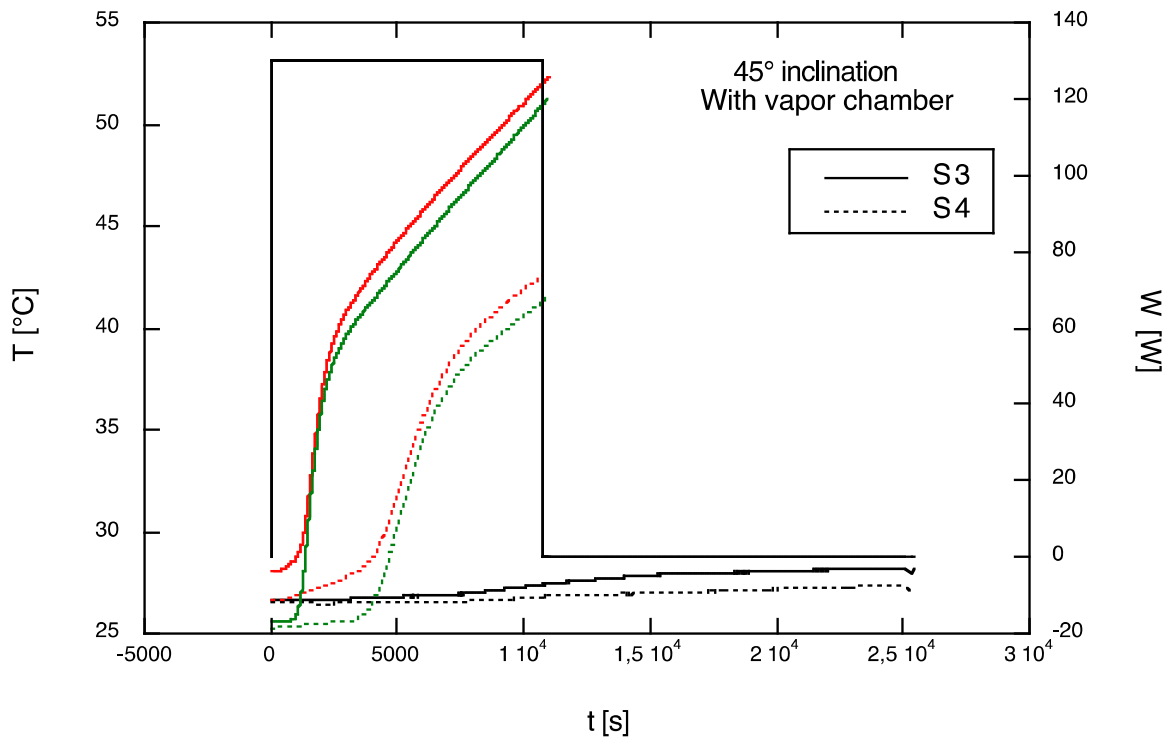


Fig. 88 – Confronto fra le temperature rilevate dalle sonde 3 e 4 nei vari test, con la vapor chamber.

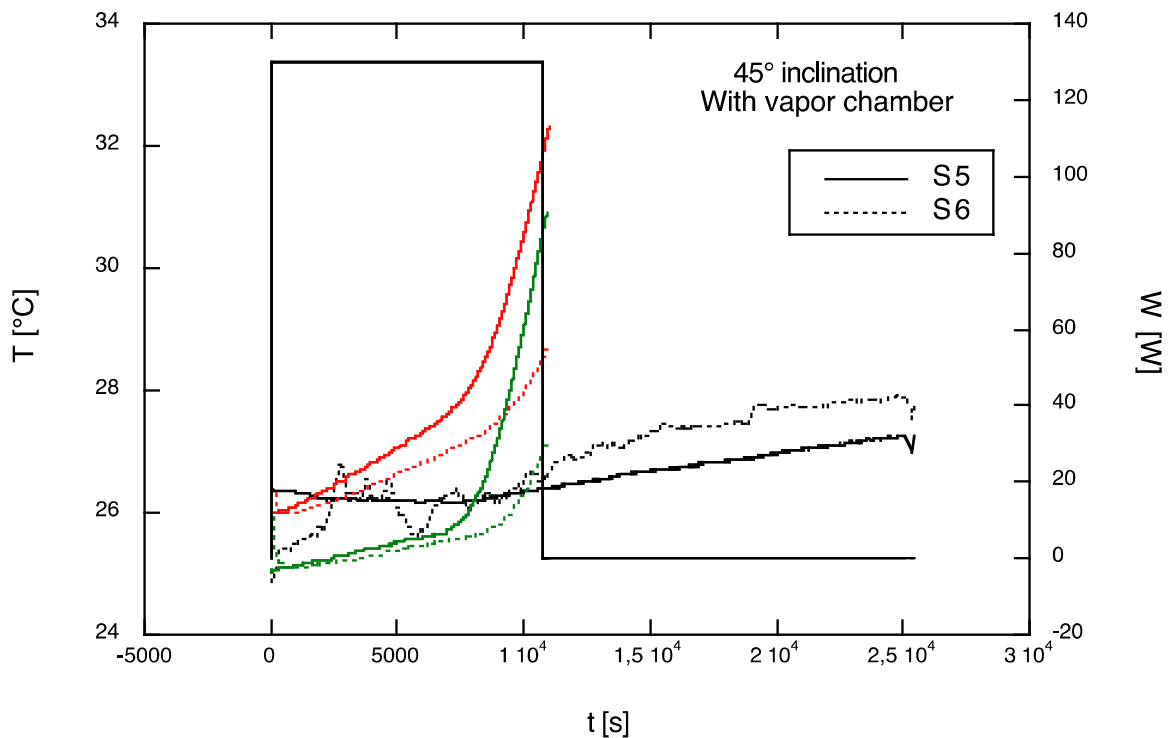


Fig. 89 – Confronto fra le temperature rilevate dalle sonde 5 e 6 nei vari test, con la vapor chamber.

Per ultimi riportiamo i grafici più interessanti per la nostra ricerca il confronto fra le prove senza e con la vapor chamber, figure 90-92. Per completezza riportiamo anche il grafico di confronto del Test 0, anche se già visto in precedenza. Il Test 3 con vapor chamber non è stato eseguito in quanto la configurazione sembrava dare risultati peggiori nel test senza la vapor chamber.

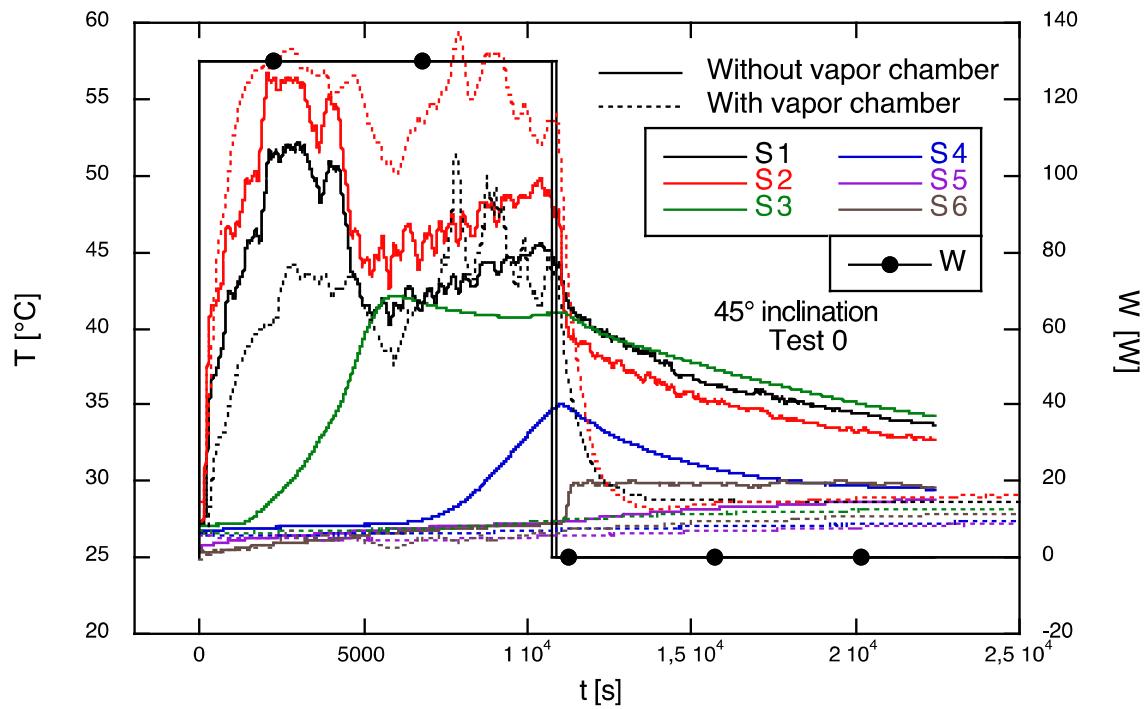


Fig. 90 - Confronto fra le temperature nel Test 0, con e senza la vapor chamber.

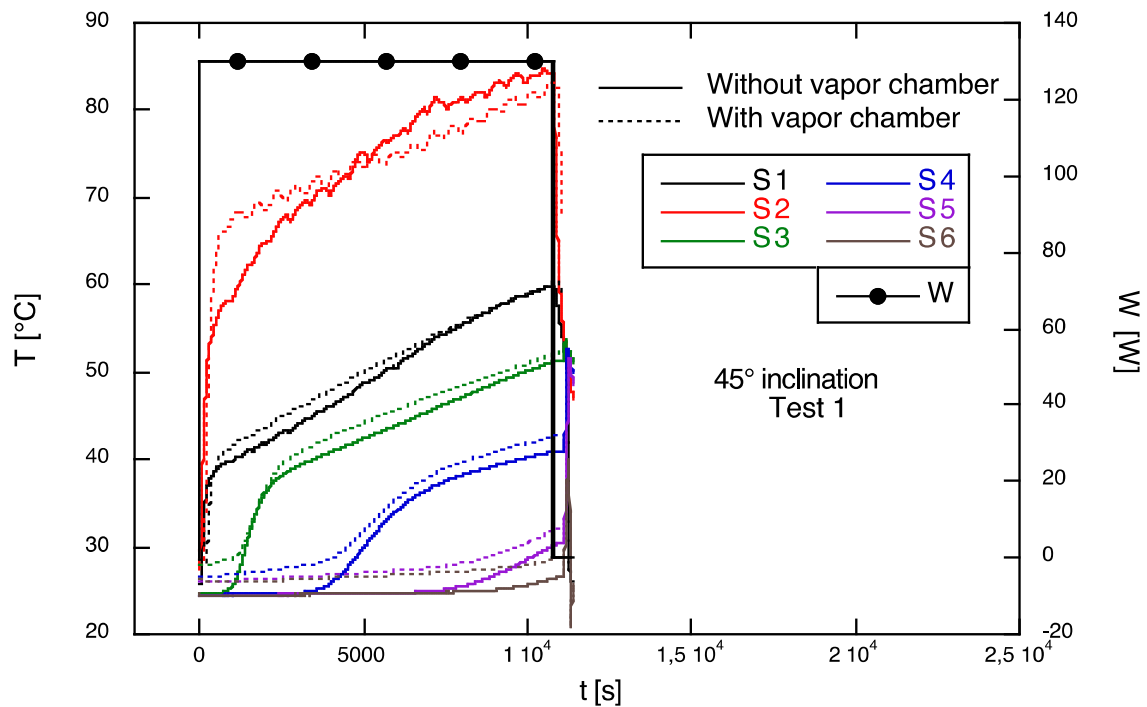


Fig. 91 - Confronto fra le temperature nel Test 1, con e senza la vapor chamber.

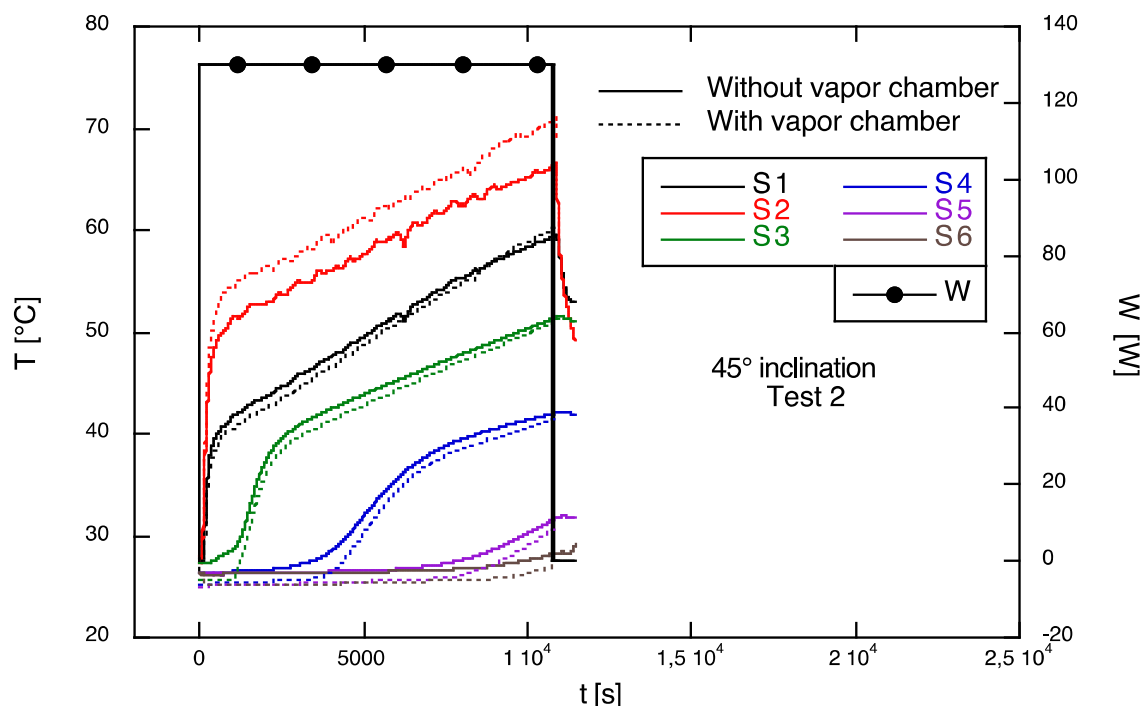


Fig. 92 – Confronto fra le temperature nel Test 2, con e senza la vapor chamber.

Dall'esame delle figure 79-83 si può notare come la coibentazione maggiore evita le oscillazioni e quindi rendono più stabile il sistema. Vediamo però adesso l'influenza della coibentazione sul comportamento del nuovo collettore solare. Dall'esame delle figure 84-86, che si riferiscono alle prove effettuate senza la presenza della vapor chamber nel collettore, si nota come la sezione di prova meno isolata (test 1) ha una temperatura più alta nella parte alta del tubo ricevitore dove si concentra la maggior parte del calore; tutte le altre sonde, ad eccezione della 6, hanno la temperatura crescente con il maggior isolamento. Quando è invece presente la vapor chamber, figure 87-89, la minore coibentazione sul Test 1 provoca un aumento delle temperature su tutto il sistema, quindi su tutte le termocoppie. Tutto ciò si ritrova nel confronto fra il collettore senza e con la vapor chamber, figure 90-92. Tralasciando il test senza coibentazione (Test 0) di cui si è già ampiamente discusso, possiamo notare che nel caso del Test 1 tutte le temperature misurate in presenza della vapor chamber sono maggiori di quelle misurate nel caso senza vapor chamber. Fa eccezione la sonda 2, dove le temperature dei due casi si incrociano durante la prova: all'inizio la temperatura S2 con vapor chamber è maggiore, poi quella senza vapor chamber la supera ed a fine prova è superiore. Nel Test 2 invece, il comportamento è completamente differente la sonda 2 presenta valori più elevati quando la vapor chamber è presente, mentre tutte le altre temperatura hanno un andamento opposto con le temperature senza vapor chamber sempre più elevate di quelle con la vapor chamber presente. Tutto Questo fa sì che la presenza della vapor chamber abbia una influenza non univoca: anche l'isolamento influisce in modo corposo sul sistema.

L'ultima prova sperimentale effettuata riguarda la prova sul pannello completo fornito dalla ditta Kloben ed effettuata presso il C.R. ENEA di Trisaia. di seguito forniamo delle foto del pannello montato sul banco di prova presente presso i laboratori ENEA della Trisaia, figure 93-100.

In questo primo anno di attività le prove che si possono fare sono solo le prove preliminari, inoltre essendo il sistema un sistema integrato collettore-accumulo le prove di efficienza istantanea non possono essere effettuate. Quindi la prova che è stata fatta riguarda solo la produzione energetica giornaliera.

Queste prove vengono effettuate durante l'arco di una giornata intera e sono così realizzate. Per prima cosa tutto il sistema viene "termalizzato": schermato il pannello dalla radiazione solare viene fatta circolare acqua mediante l'uso di pompe, tutto l'impianto è sottoposto a questo flusso di acqua.

L'acqua viene mantenuta sempre alla stessa temperatura fino a che tutto è stabile: sia la temperatura di ingresso che di uscita del pannello sono uguali, ma anche tutte le strutture metalliche e non devono raggiungere la temperatura imposta all'acqua. In questa prova la temperatura utilizzata è stata di 31°C. Raggiunta la stabilità e l'uguaglianza di tutte le temperature presenti sull'impianto, viene tolto lo schermo e quindi si consente al pannello di accumulare calore dalla radiazione solare. In questa prima prova il periodo di esposizione alla luce solare è stato di sei ore. Passate le sei ore di esposizione viene nuovamente schermato il pannello, in modo che non assorba altra energia dal sole, e viene nuovamente termalizzato l'impianto, avendo cura di usare acqua alla stessa temperatura usata per la precedente termalizzazione. Le temperature di impianto vengono registrate durante questa fase poiché sarà l'integrale nel tempo della temperatura di uscita a fornire l'energia accumulata nel pannello. Nelle figure 95, 97 e 99 vengono riportati gli andamenti della radiazione solare ( $G$  [ $W/m^2$ ]) e della temperatura ambiente ( $T_{amb}$  [ $^{\circ}C$ ]), durante la fase di esposizione del pannello alla radiazione solare e quindi di accumulo di energia, in tre differenti giorni.  $G$  è la radiazione solare globale sul piano del pannello, e viene misurata con strumento apposito posto a fianco del pannello e con la stessa inclinazione, lo strumento si vede accanto al pannello nelle foto delle figure 93-94. La radiazione solare diffusa è quella che arriva dai riflessi intorno al pannello e viene anch'essa misurata, ma per semplicità non viene riportata. Nella figura 96, 98 e 100 vengono invece riportati gli andamenti delle due temperature di ingresso ( $T_{in}$  [ $^{\circ}C$ ]) e di uscita ( $T_{out}$  [ $^{\circ}C$ ]) dal pannello nonché la portata di acqua che scorre nel circuito durante la fase di scarico dell'energia dal pannello ( $m$  [ $kg/h$ ]). Pur continuando a ripetere che le prove non sono esaustive e che ulteriori verifiche, anche nel rispetto della normativa per questo tipo di prove, sono necessarie; possiamo affermare che i risultati ottenuti con questo tipo di pannello ad accumulo inserito all'interno sono promettenti.



Fig. 93 – Foto del pannello solare innovativo in prova, vista frontale.



Fig. 94 – Foto del pannello solare innovativo in prova, vista laterale.

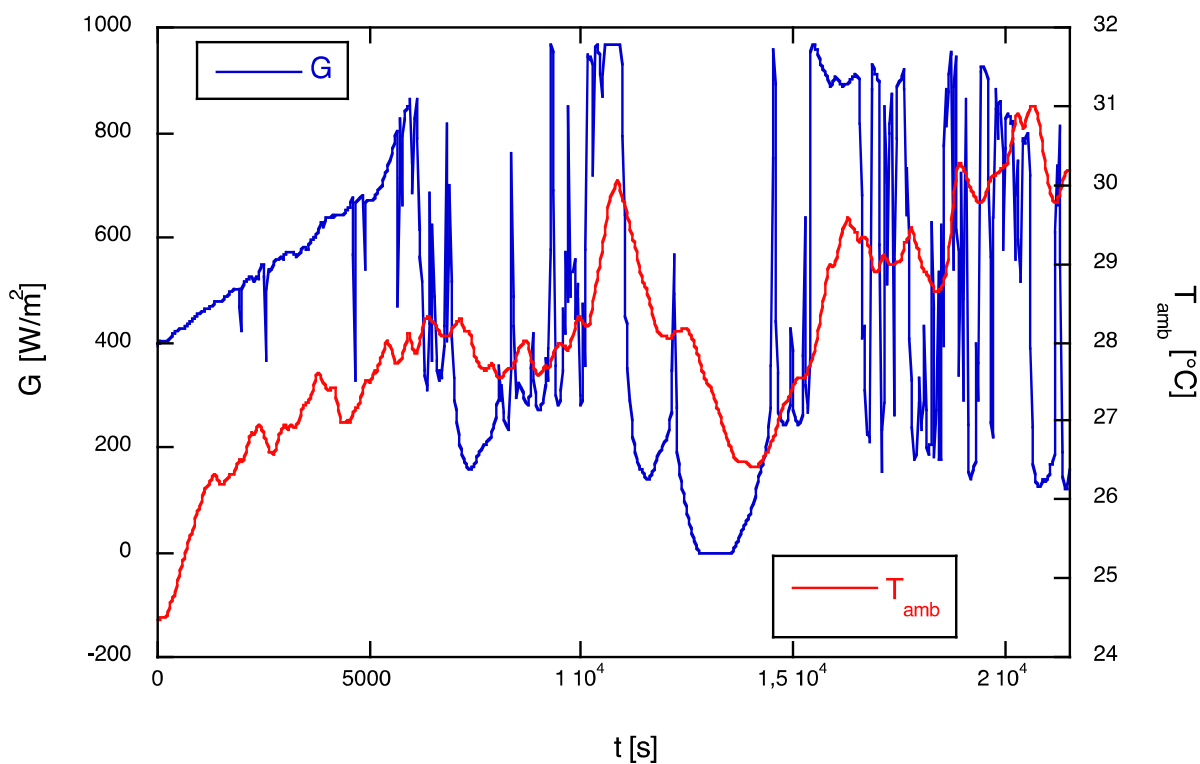


Fig. 95 –Andamento della radiazione solare globale e della temperatura ambiente durante la prova (12 settembre 2014).

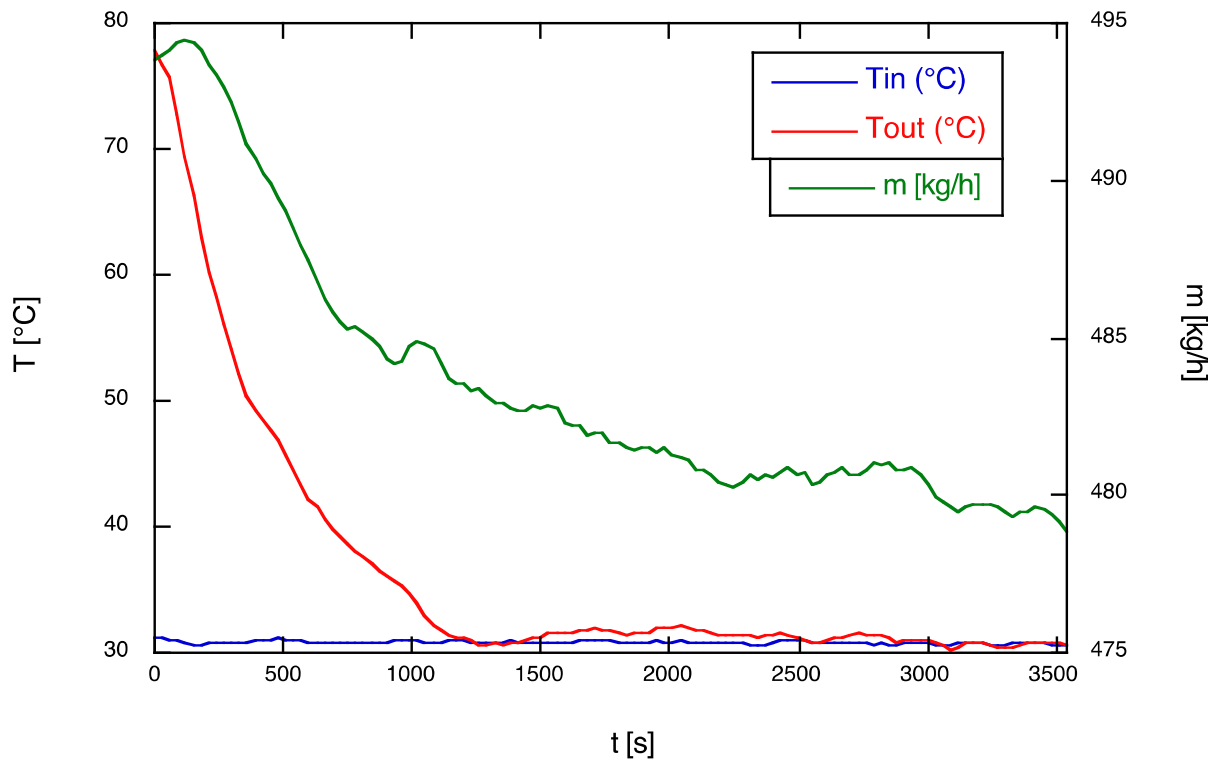


Fig. 96 – Andamento delle temperature dell’acqua in ingresso e uscita dal pannello solare e della portata del fluido (12 settembre 2014).

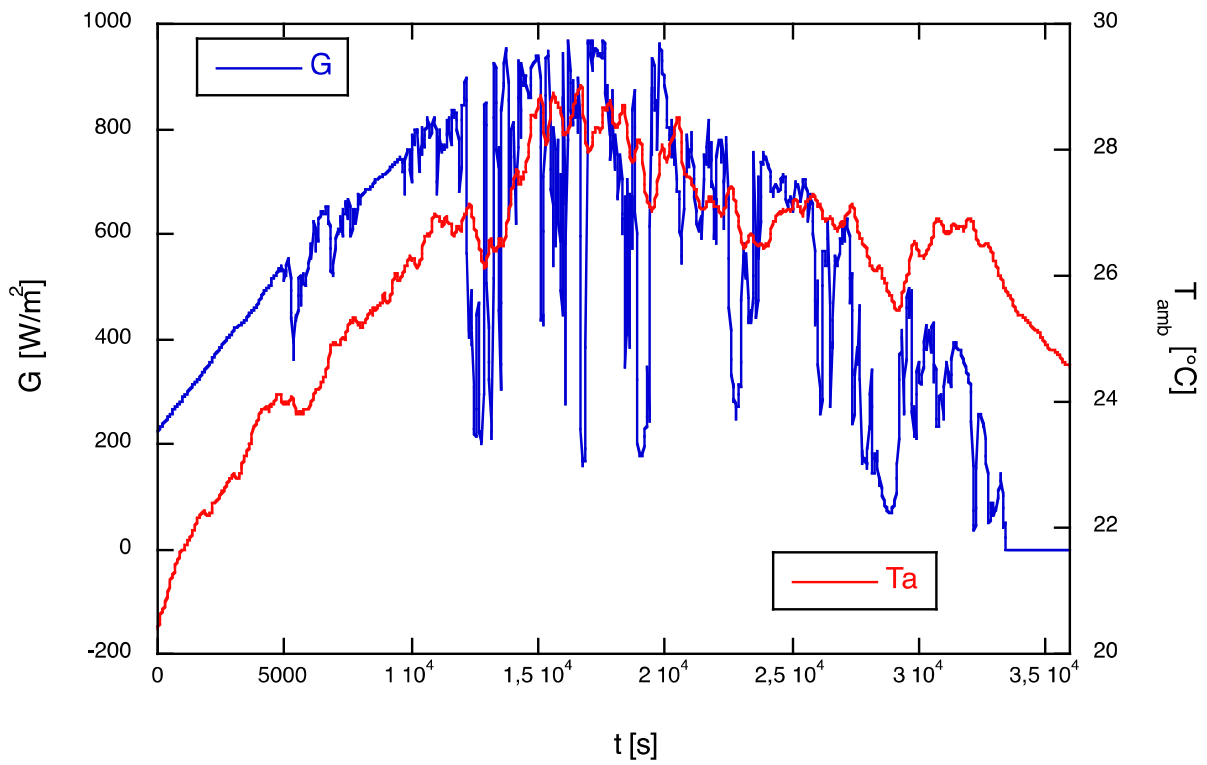


Fig. 97 – Andamento della radiazione solare globale e della temperatura ambiente durante la prova (17 settembre 2014).

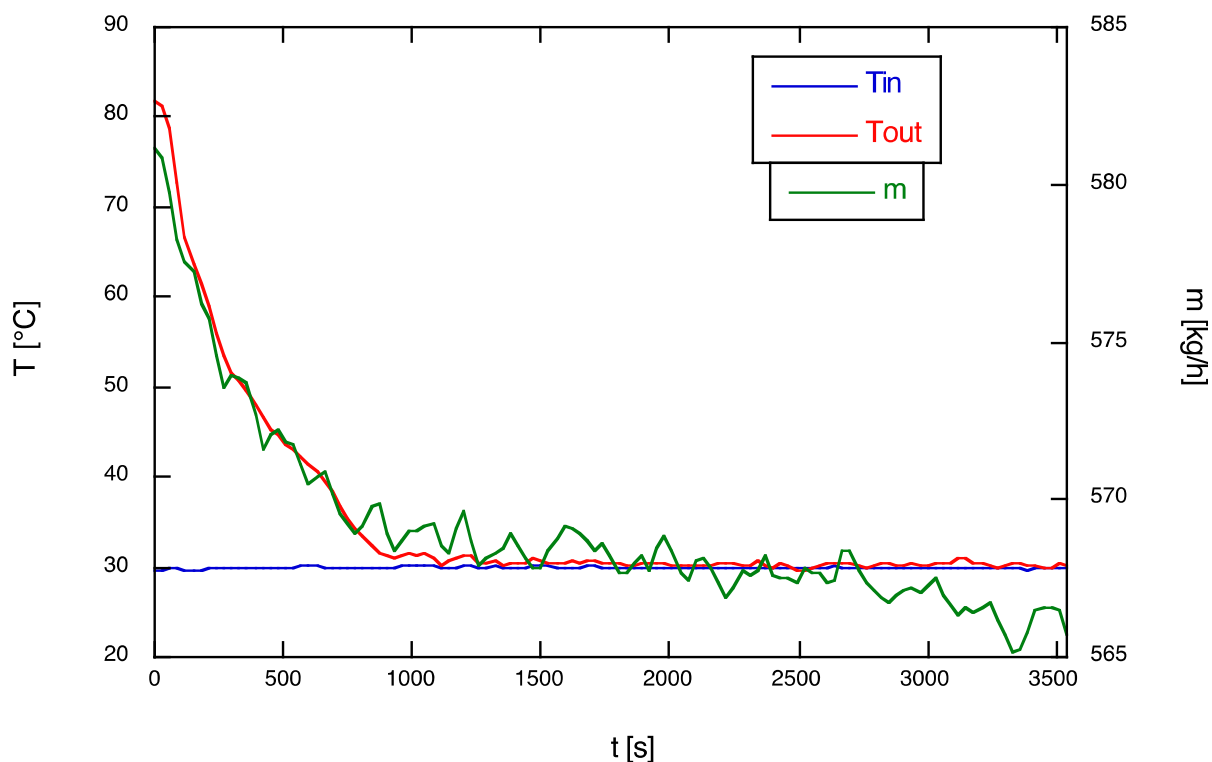


Fig. 98 – Andamento delle temperature dell’acqua in ingresso e uscita dal pannello solare e della portata del fluido (17 settembre 2014).

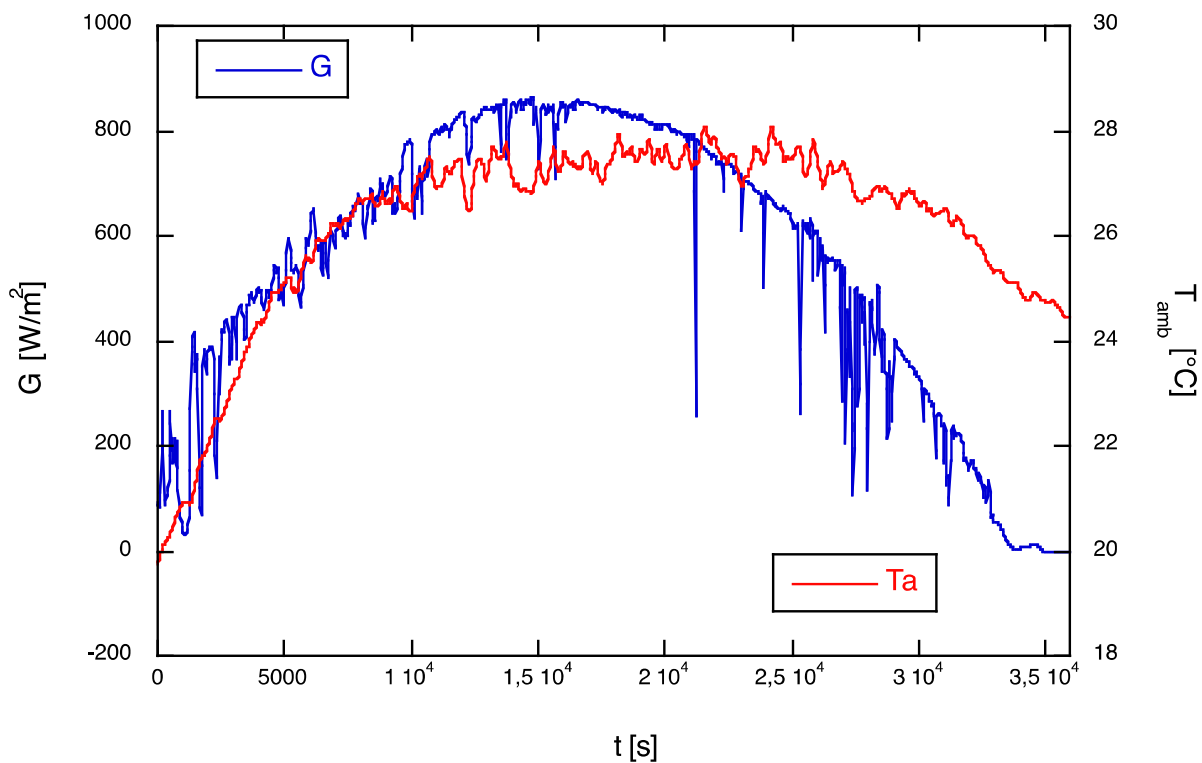


Fig. 99 – Andamento della radiazione solare globale e della temperatura ambiente durante la prova (18 settembre 2014).

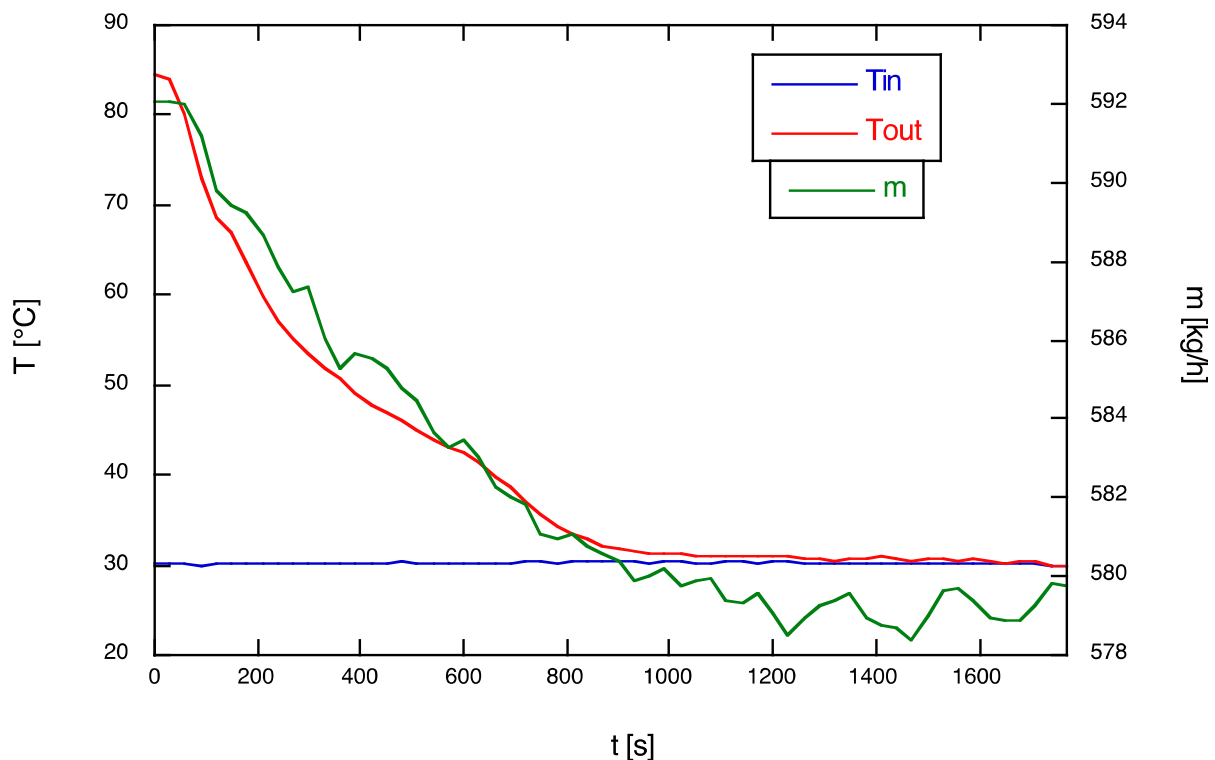


Fig. 100 – Andamento delle temperature dell’acqua in ingresso e uscita dal pannello solare e della portata del fluido (18 settembre 2014).

### 3 Conclusioni

Sono state effettuate prove sperimentali su tre diverse sezioni di prove.

La prima ha un tubo ricevitore da 8 mm e sono state provate varie inclinazioni e due diverse modalità di riscaldamento. La potenza viene fornita nel seguente modo: una rampa di durata due ore che porta la potenza da 0 a 200W, una posizione di stazionarietà di due ore con potenza sempre a 200W ed infine una discesa da 200 a 0 W sempre in due ore, con quindi la stessa velocità, in questo caso di discesa, che era stata data in salita. L’inclinazione del sistema dimostra che il tubo più inclinato è quello che meglio favorisce la circolazione naturale ed una migliore distribuzione della temperatura nel fluido presente. Nella sezione riscaldata su tutto il tubo la convezione naturale è presente, mentre su quella riscaldata solo in prossimità della fine del tubo ricevitore non c’è circolazione di acqua, precludendo il funzionamento del sistema.

La seconda sezione di prova ha un tubo ricevitore da 10 mm, più facilmente reperibile sul mercato. Sono state effettuate quindi delle nuove prove su questa nuova sezione di prova, cambiando anche la maniera di somministrare la potenza elettrica alla resistenza, infatti calcolando la superficie della banda assorbente e la potenza solare massima che si può avere si può arrivare ad affermare che la potenza che insiste sulla banda assorbente è di 130W. Quindi le prove sono state effettuate dando un gradino di potenza di 130W, come nel caso reale, per 3 ore. Il risultato è simile al caso del tubo da 8 mm con la potenza distribuita su tutta la lunghezza del tubo ricevitore. La variazione delle temperature sulla lunghezza del tubo ricevitore ed anche nel tubo collettore indica un instaurarsi della circolazione naturale che rende il sistema in grado di funzionare. La temperatura nel tubo collettore arriva a valori tali che l’uso di detta acqua da parte di un possibile utilizzatore sia compatibile con la richiesta normale di acqua calda sanitaria. Confrontando i risultati ottenuti in funzione dell’inclinazione rispetto all’orizzontale, le conclusioni sono simili a quelle ottenute con la sezione di prova da 8 mm sul tubo ricevitore.

Per provare l’effetto della presenza della vapor chamber sul collettore è stata modificata nuovamente la sezione di prova, inserendo la banda assorbente con sotto il tubo ricevitore, caso molto più vicino al caso

reale, e ponendo sopra di essa una striscia riscaldante, sempre per effetto Joule. Per mettere le vapor chamber e stata realizzata una piastra che fissasse le due vapor chamber a contatto sia con la banda assorbente (zona evaporativa del tubo di calore) che il tubo ricevitore (zona condensante dell'heat pipe). Il tubo ricevitore è da 10 mm, mentre la potenza viene fornita sempre secondo la modalità studiata per la sezione di prova precedente: gradino di potenza al tempo zero per circa tre ore e poi ritorno a zero potenza con un gradino inverso. Sono state effettuate due prove simili: la prima in cui le due vapor chambers non sono state posizionate la seconda invece in cui le vapor chambers sono presenti. Tutti gli altri parametri sono rimasti invariati. La presenza delle vapor chambers aumenta la temperatura nelle due sonde sulla parte superiore del tubo ricevitore, pur con qualche differenza. Le grosse differenze sono negli andamenti delle temperature nelle altre quattro termocoppie. Mentre nella prova senza le vapor chambers le temperature nel collettore hanno un incremento la presenza delle vapor chambers sembra bloccare questi aumenti, questo nonostante le due prove sono state effettuate con una inclinazione di 45° che è quella che meglio favorisce la circolazione naturale. Tutto questo fa concludere che la presenza delle vapor chambers favorisce lo scambio termico fra banda assorbente e tubo ricevitore, ma frena la circolazione naturale all'interno del collettore. Sono state infine eseguite sulla stessa sezione di prova dei test per verificare il comportamento del pannello cambiando la coibentazione. I risultati sono tali per cui la presenza della vapor chamber può entrare in contrasto con un maggiore isolamento termico del sistema.

La prova sul pannello completo ha dato risultati promettenti, ma test più accurati, oggetto di una campagna di prove più ampia, dovranno essere effettuati per capire la reale efficienza del sistema.

Concludendo si può affermare che le prove effettuate hanno permesso di verificare il buon funzionamento del nuovo tipo di collettore solare con serbatoio integrato al suo interno. L'instaurarsi della convezione naturale, che rende possibile la circolazione dell'acqua all'interno del sistema, ed il raggiungimento di elevate temperature, che rendono possibile l'utilizzo della "acqua calda" da parte dell'utente, ci dimostrano la convenienza del nuovo tipo di collettore solare. Le limitazioni alla sperimentazione non hanno consentito di ottimizzare il sistema, soprattutto nell'ultima fase sperimentale con l'uso delle vapor chambers applicate sotto alla piastra assorbente la radiazione solare. Una migliore progettazione ed un programma di prove più completo darebbero più certezze sull'uso della nuova tecnologia, inoltre consentirebbe di rendere più accurata la simulazione sia con i codici di calcolo che con il programma sviluppato dall'università di Padova.