

POLITECNICO DI TORINO



Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale
ottobre 2025

FIBRE OTTICHE E SENSORI PER APPLICAZIONI AEROSPAZIALI

Relatore: Matteo Dalla Vedova

Correlatore : Aimasso Alessandro

Correlatore: Bertone Matteo

Abstract

Il monitoraggio termico è un requisito fondamentale per la gestione del ciclo di vita di sistemi spaziali: il mantenimento di condizioni operative nominali è essenziale per garantire affidabilità e durata delle missioni. I sensori tradizionali, come le termocoppie, pur essendo consolidati, presentano limiti legati a massa, cablaggi e suscettibilità ai disturbi elettromagnetici. In questo contesto, i sensori a reticolo di Bragg in fibra ottica (FBG) offrono una soluzione innovativa grazie alla leggerezza, alla possibilità di multiplexare più punti di misura lungo una singola fibra e all'immunità ai disturbi esterni.

Il presente lavoro di tesi ha come obiettivo la valutazione dell'affidabilità dei sensori FBG per un monitoraggio integrato termico e funzionale del sistema considerato, nel caso in oggetto una piastra metallica integrata con un heat pipe sollecitata da una cartuccia termica. Questo sistema ha come obiettivo di simulare un pannello radiativo sollecitato da carico termico applicato. A tal fine è stato realizzato un banco di prova dotato di quattro sensori FBG distribuiti su due linee di fibra e sollecitato da una cartuccia riscaldante. I dati acquisiti sono stati confrontati con i dati calcolati di un modello termico sviluppato in ambiente MATLAB/Simulink.

I risultati sperimentali hanno evidenziato una buona sensibilità e ripetibilità delle misure svolte in diversi cicli termici, mentre il modello numerico ha mostrato un'elevata coerenza con le misure sperimentali, confermando l'affidabilità dell'approccio proposto.

In conclusione, la ricerca conferma i sensori FBG come tecnologia affidabile per il monitoraggio termico aerospaziale e ne dimostra la capacità, integrata a modelli numerici, di distinguere condizioni nominali da off-nominali degli specifici componenti strumentati. I risultati ottenuti rappresentano un primo step verso lo sviluppo di reti sensoriali distribuite e diagnostica predittiva a bordo di sistemi spaziali.

INDICE

Abstract

I. Introduzione

1.1 Contesto generale.....	pag. 6
1.2 Interesse applicativo.....	pag. 7
1.3 Obiettivo e contributo.....	pag. 8
1.4 Struttura della ricerca.....	pag. 9

II. Stato dell'arte

2.1 Heat pipe.....	pag. 11
2.1.1 Sviluppo storico e tecnologico delle heat pipe.....	pag. 11
2.1.2 Principio di funzionamento.....	pag. 12
2.1.3 Vantaggi e limiti operativi.....	pag. 14
2.1.4 Analisi di letteratura.....	pag. 16
2.1.5 Gap di ricerca e motivazione.....	pag. 17
2.2 Sensori FBG (Fiber Bragg Gratings)	pag. 18
2.1.1 Concetti teorici essenziali.....	pag. 18
2.1.2 Caratteristiche principali.....	pag. 19
2.1.3 Limiti tecnologici.....	pag. 20
2.1.4 Analisi di letteratura.....	pag. 22
2.1.5 Gap di ricerca e motivazione.....	pag. 23

III. Metodologia

3.1 Problema di riferimento.....	pag. 23
3.2 Percorso progettuale.....	pag. 24

IV. Apparato Sperimentale

4.1 Scelta dei materiali	pag. 27
4.1.1 Heat Pipe.....	pag. 27
4.1.2 Involucro isolante termico.....	pag. 28
4.1.3 Piastra radiativa.....	pag. 30
4.1.4 Sensori FBG.....	pag. 31
4.2 Progettazione e Procedura di integrazione.....	pag. 32
4.2.1 Definizione della configurazione ottimale.....	pag. 32
4.2.2 Processo di saldatura.....	pag. 34
4.2.3 Processo di integrazione.....	pag. 35
4.2.4 Mappa dei sensori.....	pag. 36
4.3 Caratterizzazione termica dei Sensori.....	pag. 38
4.3.1 Set up camera climatica.....	pag. 38
4.3.2 Acquisizione dei dati e grafici di taratura.....	pag. 38
4.4 Applicazione sorgente termica.....	pag. 41
4.4.1 Computer	pag. 42
4.4.2 Arduino.....	pag. 46
4.4.3 Relè e calibrazione duty cycle.....	pag. 46
4.4.4 Modulo di alimentazione elettrica.....	pag. 47
4.4.5 Cartuccia termica.....	pag. 47

V. Test sperimentali

5.1 Procedura di acquisizione	pag. 48
5.2 Tempistiche sperimentazione.....	pag. 49
5.3 Grafici test sperimentali.....	pag. 51
5.3.1 Configurazione on nominal heat pipe.....	pag. 52
5.3.1 Configurazione on nominal estremità sinistra.....	pag. 54
5.3.1 Configurazione off nominal heat pipe.....	pag. 56
5.3.1 Configurazione off nominal estremità destra.....	pag. 58
5.4 Confronto cicli.....	pag. 60
5.5 Confronto tra configurazione on/off nominal.....	pag. 62

VI. Modello numerico in MATLAB/Simulink

6.1 Modello generale.....	pag. 66
6.1.1 Heat pipe.....	pag. 67
6.1.2 Circuito heat pipe.....	pag. 69
6.1.3 Miglioramento heat pipe.....	pag. 70
6.1.4 Pannello radiativo.....	pag. 71
6.1.5 Adattamento pannello radiativo ai dati sperimentali.....	pag. 73
6.2 Grafici Simulink	pag. 74

VII. Confronto dei test sperimentali/Simulink

7.1 Configurazione on nominal (Heat pipe posizione 1).....	pag. 77
7.2 Configurazione on nominal (Heat pipe posizione 5).....	pag. 78
7.3 Configurazione off nominal (Heat pipe posizione 1).....	pag. 79
7.4 Configurazione off nominal (Heat pipe posizione 5).....	pag. 81
7.5 Criticità test.....	pag. 82

VIII Conclusioni

8.1 Conclusioni.....	pag. 85
8.2 Riferimenti bibliografici.....	pag. 86
8.3 Appendici.....	pag. 87

I. INTRODUZIONE

1.1 Contesto Generale

Nel settore aerospaziale la gestione termica riveste un ruolo cruciale per garantire la sopravvivenza e l'efficienza di veicoli e strumenti. Ogni componente di un velivolo o satellite ha un intervallo di temperatura ammissibile entro cui deve rimanere in condizioni operative, pena il rischio di malfunzionamenti o danni permanenti. L'ambiente spaziale, in particolare, presenta condizioni estreme: in assenza di atmosfera, il lato in ombra di un satellite può raffreddarsi fino a temperature prossime allo zero assoluto, mentre il lato esposto al Sole può surriscaldarsi oltre i 200 °C. Inoltre, nel vuoto non vi è convezione e il trasferimento di calore avviene solo per irraggiamento o conduzione interna, rendendo difficile smaltire l'energia termica in eccesso. Senza un adeguato controllo termico, l'elettronica di bordo potrebbe congelare o surriscaldarsi oltre i limiti operativi, i lubrificanti solidificare, le batterie perdere efficienza e le strutture subire deformazioni da shock termici. In sintesi, il Thermal management – ossia l'insieme di soluzioni per bilanciare assorbimento, generazione e dispersione del calore in un sistema spaziale – è fondamentale per assicurare che ogni sottosistema operi entro condizioni di temperatura sicure durante tutte le fasi di missione [1].

Tra i dispositivi fondamentali impiegati nei sistemi di gestione termica rivestono un ruolo centrale i sensori di temperatura. I sensori termici forniscono infatti informazioni essenziali per la sicurezza, l'affidabilità e l'efficienza di un veicolo spaziale, contribuendo a preservare l'integrità strutturale, a sorvegliare i sistemi di potenza (come batterie e pannelli solari), a mantenere un ambiente appropriato per strumenti scientifici o astronauti, oltre a calibrare le misurazioni di bordo e ad attivare allarmi o procedure automatiche di emergenza. Sin dagli anni '60 e '70, le agenzie spaziali hanno investito nello sviluppo di sensori termici affidabili: la NASA, ad esempio, avviò già nei primi anni '70 un programma di qualificazione di termistori ad alte prestazioni per impiego spaziale [2]. Nel 1972 la sonda Pioneer 10, prima missione verso Giove, montava a bordo sensori di temperatura basati su termistori prodotti secondo le specifiche NASA Goddard (GSFC S-311-P-18) [3]. Da allora, termocoppie, termoresistenze al platino e termistori appositamente progettati hanno accompagnato l'evoluzione dei satelliti e delle

sonde interplanetarie, fornendo dati indispensabili per il controllo termico attivo. L'evoluzione storica di questi sensori ha permesso di aumentare la loro precisione e sensibilità, riducendo il loro ingombro e migliorando la resistenza alle radiazioni e alle sollecitazioni di lancio. Questo ci permette di aspirare a missioni sempre più durature ed ambiziose.

1.2 Interesse applicativo

L'attuale generazione di satelliti e veicoli spaziali è caratterizzata da un crescente livello di complessità (missioni di lunga durata, l'impiego di carichi utili sensibili, adozione massiccia di materiali compositi) che impone la necessità di trovare soluzioni innovative per il controllo e la diagnostica dei parametri critici. Per questo motivo negli ultimi anni si sta sviluppando una nuova classe di dispositivi che sfruttano la fotonica per il monitoraggio delle grandezze fisiche: i sensori a reticolo di Bragg in fibra ottica. Questi sensori sono costituiti da una sezione di fibra nella quale viene inciso un reticolo periodico (variazione periodica dell'indice di rifrazione della fibra) capace di riflettere selettivamente una specifica lunghezza d'onda della luce incidente. La posizione del picco riflesso varia in funzione della temperatura e della deformazione locale della fibra, consentendo di ottenere una misura diretta e precisa delle condizioni operative. I sensori FBG rappresentano una soluzione interessante perché sono dispositivi in cui c'è la possibilità di integrare numerosi reticoli lungo la stessa fibra. Questo ci permette di realizzare un sistema di misura distribuito che riduce drasticamente la quantità di cablaggi necessari rispetto alle soluzioni elettriche convenzionali. Ulteriori vantaggi sono la leggerezza, l'immunità ai disturbi elettromagnetici e la capacità di operare in ambienti ostili; caratteristiche molto interessanti per applicazioni aerospaziali.

In questa fase di sviluppo le applicazioni principali si rivolgono dal monitoraggio termico dei sottosistemi elettronici e delle batterie, alla severa sorveglianza di serbatoi criogenici, fino all'integrazione in pannelli radiativi e strutture composite per realizzare sistemi intelligenti di structural health monitoring. Una particolare attenzione va sicuramente all'integrazione nelle piastre radiative di dispositivi dissipanti come gli heat pipe. Questa integrazione ci permette di ottenere una distribuzione accurata delle temperature superficiali e di validare i modelli numerici di trasferimento termico.

In un contesto in cui le agenzie spaziali e le aziende private stanno orientando gli sforzi verso missioni di lunga durata, costellazioni satellitari di grande scala e veicoli riutilizzabili, l'adozione di soluzioni di monitoraggio leggere, robuste e multifunzionali diventa una priorità [4]. Le caratteristiche peculiari dei sensori FBG spiegano perché questa tecnologia stia attirando crescente attenzione come alternativa o complemento alle soluzioni consolidate, aprendo la strada a nuove prospettive per il controllo termico e strutturale dei veicoli spaziali del futuro.

1.3 Obiettivo e contributo

L'obiettivo centrale di questa ricerca è la valutazione dell'affidabilità dei sensori a reticolo di Bragg in fibra ottica (FBG) per il monitoraggio termico di una piastra radiativa in cui è stata implementata trasversalmente un heat pipe. L'idea alla base del lavoro consiste nell'integrare una rete di sensori ottici direttamente sulla superficie della piastra e nel sottoporla a sollecitazioni termiche controllate, così da verificare la capacità dei sensori stessi di misurare con precisione l'andamento della distribuzione termica e di rispondere in maniera ripetibile a diversi regimi di funzionamento.

A pari passo ci si concentra allo sviluppo di un modello numerico tramite Simulink che ha il compito di simulare le condizioni operative del banco di prova sperimentale. Infatti, il modello è stato modificato e calibrato con i parametri previsti dal banco in modo da poter confrontare i risultati i test sperimentali con quelli simulati da Simulink. Uno degli obiettivi è avere coerenza tra le misure reali e predizioni simulate con il quale si definisce la validità del metodo proposto.

Un ulteriore contributo originale di questa tesi risiede nell'aver considerato due differenti scenari operativi, uno di tipo nominale e uno di tipo off-nominale. La piastra integrata con un heat pipe funzionante è in grado di svolgere in modo efficiente il compito di trasmissione di calore, rispettando le i requisiti di progetto. Nel caso di heat pipe danneggiata abbiamo un dispositivo che non rispetta più i requisiti di progetto con il quale possiamo analizzare comportamenti anomali. Questa scelta metodologica permette di ampliare la portata del lavoro oltre la semplice validazione del sensore e del modello, spostando l'attenzione anche verso la diagnostica dello stato di salute della piastra radiativa. In altre parole, l'integrazione di sensori FBG e di un modello numerico accurato non si limita a monitorare le grandezze termiche in condizioni nominali, ma consente anche di

riconoscere e discriminare situazioni in cui il comportamento del sistema si discosta da quello atteso.

Il contributo scientifico di questa ricerca si può riassumere in tre punti cardini:

- Verifica sperimentale dell'affidabilità dei sensori FBG per applicazioni termiche in ambito aerospaziale;
- La calibrazione e validazione di un modello numerico rappresentativo delle condizioni reali di un banco prova;
- La possibilità di riconoscere stati di funzionamento off nominal del sistema combinando i dati reali dei sensori con le prestazioni calcolate dal modello

Questi argomenti permettono di porre delle basi per la realizzazione di reti sensoriali distribuite, capaci di integrare funzioni di monitoraggio e diagnostica predittiva a bordo di sistemi spaziali complessi.

1.4 Struttura della ricerca

La presente tesi è articolata in sette capitoli, organizzati partendo dal contesto generale fino alla presentazione dei risultati e delle conclusioni finali.

- **Capitolo 1 – Introduzione:** In questo capitolo viene descritto il contesto generale della ricerca, l'interesse applicativo della fibra in ambito aerospaziale concludendo con l'obiettivo e il contributo di tale lavoro.
- **Capitolo 2 – Stato dell'arte:** In questo capitolo vengono descritti gli elementi principali della ricerca: sensori FBG e heat pipe. La descrizione si concentra sul funzionamento, vantaggi e svantaggi, rassegna dei lavori e gap di ricerca e motivazioni.
- **Capitolo 3 – Metodologia:** In questo capitolo si parte con il presentare il problema di riferimento e l'approccio perseguito per poter risolvere tale problema. L'approccio consiste nella progettazione del banco di prova seguito dallo sviluppo del modello numerico e infine lo sviluppo del modello numerico e le procedure di calibrazione e acquisizione dei dati.
- **Capitolo 4 – Apparato sperimentale:** fornisce una descrizione dettagliata del banco di prova realizzato, della strumentazione impiegata e delle condizioni operative dei test eseguiti

- **Capitolo 5-Test sperimentali:** In questo capitolo vengono illustrati e commentati i vari grafici ottenuti sperimentalmente.
- **Capitolo 6 – Modello Simulink :** In questo capitolo viene descritto il modello Simulink con le modifiche effettuate per renderlo più analogo possibile al modello sperimentale, illustrando i grafici risultanti.
- **Capitolo 8 – Confronto Test:** In questo capitolo vengono illustrati e confrontati i grafici dei test ottenuti sperimentalmente e con il modello Simulink evidenziando le analogie e le differenze tra i due risultati.
- **Capitolo 9 – Conclusioni e sviluppi futuri:** In questo capitolo si riassume i risultati ottenuti mettendo in evidenza il contributo scientifico della ricerca e suggerisce direzioni per futuri approfondimenti o sviluppi.

Questa struttura ci permette di illustrare la sequenza logica implementata per poter ottenere dei risultati validi e confrontabili partendo da un problema iniziale di riferimento.

II. STATO DELL' ARTE

La presente tesi, finalizzata allo studio del comportamento a livello termico di una piastra radiativa attraversata trasversalmente da un heat pipe e monitorata mediante sensori FBG in condizioni di surriscaldamento, circoscrive l'analisi dello stato dell'arte a due elementi cardine: gli heat pipe e i sensori FBG.

Questa scelta è giustificata dal fatto che questi componenti rappresentano il nucleo tecnologico del banco sperimentale sviluppato. Di conseguenza, verranno approfondite l'evoluzione e le tappe principali dello sviluppo di tali dispositivi, i principi di funzionamento che ne regolano l'impiego, nonché i limiti e le criticità tuttora oggetto di indagine. L'analisi consentirà così di evidenziare le lacune presenti nella letteratura e di motivare la necessità della ricerca qui proposta, la quale intende collocarsi proprio in quegli spazi ancora non pienamente esplorati, fornendo un contributo originale e rilevante al progresso della conoscenza nel settore.

2.1 Heat pipe

2.1.1 Sviluppo storico e tecnologico delle heat pipe

Un tubo di calore, comunemente noto con il termine *heat pipe*, è un dispositivo passivo in grado di trasferire quantità di calore molto elevate con una differenza di temperatura minima tra le estremità calde e fredde. La formulazione iniziale del concetto di *heat pipe* risale alla metà dell'Ottocento, quando A. M. Perkins brevettò il Tubo di Perkins [5]: un primitivo termosifone che trasferiva calore da una fornace a un bollitore. Questo rudimentale sistema sfruttava il cambio di fase di una piccola quantità d'acqua in un tubo sigillato per convogliare calore verso l'alto (evaporando in basso e condensando in alto), con il condensato che tornava per gravità all'origine. La limitazione evidente del termosifone di Perkins era legata alla sua dipendenza dall'orientazione: questo significa che per far ritornare il liquido condensato all'evaporatore era necessario la gravità. Di conseguenza l'estremità calda doveva trovarsi necessariamente nel punto più basso affinché il dispositivo funzionasse correttamente.

La svolta che aumentò l'interesse per questa tecnologia arrivò solo nel 1944, quando Gaugler propose di introdurre una struttura capillare lungo tutte le pareti interne del tubo (un wick poroso) per permettere al liquido condensato di tornare all'evaporatore tramite l'azione capillare invece che per gravità. Questa intuizione permise alle future generazioni di heat pipe di funzionare in qualunque orientamento, persino in assenza di gravità (applicazioni spaziali). Tra il 1963 e il 1964, Grover e collaboratori a Los Alamos fabbricarono il primo dispositivo di questo tipo e coniarono il termine heat pipe, descrivendolo come un sistema in grado di condurre calore con un'efficacia molto superiore a quella di qualunque metallo allora utilizzato. Questa efficacia era raggiunta grazie all'uso del calore latente di evaporazione/condensazione in un circuito chiuso che permetteva al heat pipe di fornire una conducibilità termica apparente di ordini di grandezza maggiore rispetto ai comuni conduttori solidi. Da quel punto di svolta per questi dispositivi c'è stata una rapida crescita tecnologica e sono stati applicati in numerosi settori industriali, dai sistemi di raffreddamento elettronico al controllo termico di satelliti spaziali, dal recupero energetico in impianti HVAC al mantenimento del permafrost in ambito geotecnico. Oggi i tubi di calore rappresentano una tecnologia ben consolidata e ampiamente usata per la gestione termica in molteplici contesti.

2.1.2 Principio di funzionamento

Schema di principio di funzionamento un tubo di calore con stoppino capillare interno (Figura 2.1). Il calore in ingresso all'estremità calda (in rosso) provoca l'evaporazione del fluido di lavoro; il vapore si sposta verso l'estremità fredda dove condensa (in blu) cedendo calore;

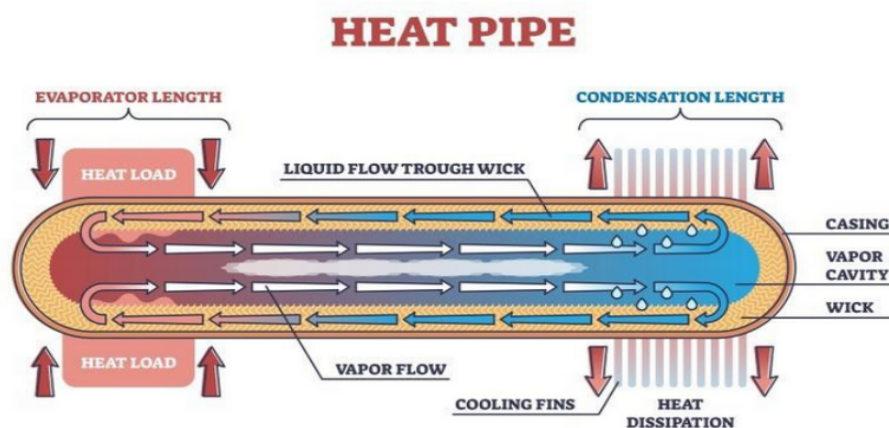


Fig.2.1 Schema funzionamento heat pipe

il liquido condensato viene riassorbito dallo stoppino (wick) e ritorna per capillarità verso la sezione calda, chiudendo il ciclo termico.

L'heat pipe tradizionale si può dividere in tre sezioni principali: l'evaporatore (in corrispondenza della sorgente di calore da dissipare), la sezione adiabatica intermedia (dove il vapore trasferisce il calore senza che per definizione consideriamo senza ulteriori scambi con l'esterno) e il condensatore (sezione che ha il compito di dissipare il calore ed è a contatto con la sorgente fredda o il radiatore). L'involucro è sigillato ermeticamente e le pareti interne sono rivestite con una struttura capillare porosa (wick), satura del fluido di lavoro in fase liquida. Quando l'estremità dell'evaporatore viene riscaldata, il fluido in quella zona evapora assorbendo calore e genera vapore a una certa pressione di saturazione; il vapore così prodotto fluisce all'interno della cavità verso la zona più fredda del tubo (condensatore) spinto proprio dal gradiente di pressione. Giunto all'estremità fredda, il vapore cede energia termica condensando nuovamente in liquido e inondando la struttura capillare del condensatore. A questo punto entra in gioco la capillarità: la differenza di pressione capillare tra la zona fredda (wick imbevuto di liquido) e la zona calda (wick parzialmente asciutto per via dell'evaporazione) origina una forza capillare che permette al liquido di tornare all'indietro, attraverso i micro-canali dello stoppino disposti nell'estremità fredda verso l'evaporatore. In questo modo il fluido condensato ritorna a bagnare ciclicamente la regione calda dell'evaporatore, creando un ciclo evaporazione–condensazione continuo.

Il risultato è un trasferimento di calore molto efficiente lungo il tubo: il calore viene trasportato sotto forma di calore latente di vaporizzazione e spostato rapidamente dal vapore, con una caduta di temperatura estremamente ridotta tra evaporatore e condensatore. In pratica un heat pipe si comporta quasi come un conduttore ideale (a bassissima resistenza termica), senza bisogno di apporti esterni di energia né parti meccaniche in movimento.

Va però notato che, per sostenere questo ciclo in regime stazionario, la pressione capillare generata dal wick deve essere sufficiente a vincere le varie perdite di carico opposte al flusso del fluido. In altre parole, la capillarità deve poter controbilanciare sia la resistenza del flusso liquido di ritorno, sia la resistenza opposta dal flusso di vapore, oltre all'eventuale pressione idrostatica se il tubo è orientato con l'evaporatore sopra al condensatore. Finché questa condizione viene soddisfatta, il tubo di calore opera correttamente anche in posizioni non verticali o

in assenza di peso. Viceversa, se il carico termico applicato eccede la capacità di pompaggio capillare del wick, l'evaporatore tenderà a svuotarsi (fenomeno di dry-out) interrompendo il funzionamento regolare del dispositivo [6].

2.1.3 Vantaggi e limiti operativi

In elenco, vengono inizialmente illustrati i principali vantaggi delle heat pipe rispetto alle soluzioni convenzionali:

- **Alta conducibilità termica equivalente:**
L'heat pipe ha la capacità di raggiungere conduttanze termiche elevate che possono raggiungere l'ordine di 10^3 – 10^5 W/m·K, grazie al trasporto latente di calore. Questi dispositivi hanno un'efficienza che si dimostra essere tre ordini di grandezza superiore rispetto i metalli ad alta conducibilità (rame, argento).
- **Trasferimento quasi isotermico:**
Il gradiente termico tra evaporatore e condensatore è tipicamente piccolo con valori compresi tra 1–3 °C e questo vale anche con flussi termici elevati. Questo permette di avere uniformità termica e una riduzione dei gradienti termici che potrebbero in futuro danneggiare irreversibilmente componenti sensibili.
- **Affidabilità operativa in condizioni estreme:**
L'heat pipe è una tecnologia che non prevede parti mobili che potrebbero rompersi compromettendo l'efficienza del dispositivo. Infatti, i dispositivi funzionano esclusivamente su evaporazione, condensazione e ritorno capillare, garantendo MTBF (Mean Time Between Failure) molto elevati in applicazioni spaziali.
- **Compatibilità con sistemi leggeri e compatti:**
Il rapporto massa/energia trasferita è molto elevata. Infatti, gli heat pipe hanno la capacità di controllare decine o centinaia di watt con tubi di pochi millimetri di diametro. Questo ci permette di ottimizzare il peso e ingombro; due caratteristiche fondamentali nell'ambito spaziale.

- Scalabilità e flessibilità progettuale:

I wick il materiale di involucro e fluidi di lavoro che si possono adottare sono molteplici e la scelta dipende da cosa si vuole ottimizzare.

Per quanto riguarda il wick abbiamo a scanalature, reticoli metallici, polveri sinterizzate mentre per i materiali di involucro c'è alluminio, rame, titanio ed infine come fluidi di lavoro abbiamo tipicamente acqua, ammoniacca, sodio.

In elenco, vengono invece illustrati i limiti principali degli heat pipe:

- Il funzionamento è vincolato da fenomeni di instabilità:
 - limite capillare: questo fenomeno avviene quando la tensione capillare del wick non riesce più a controbilanciare la caduta di pressione del flusso liquido. Questo causa il cosiddetto dry-out dell'evaporatore e il fluido non si muove più correttamente.
 - limite sonico: questo limite si raggiunge quando la velocità del vapore si avvicina a quella del suono, andando ad introdurre fenomeni aerodinamici che impediscono un corretto flusso di massa.
 - limite di ebollizione nucleata: superato il flusso critico, si formano delle bolle nel wick che impediscono al liquido di fare ritorno.
 - limite di viscosità: questo limite nasce prevalentemente a basse temperature, condizione in cui la viscosità del fluido riduce il flusso di vapore.
- Dipendenza dall'orientamento e dalla gravità:

Nonostante i wick capillari permettano agli heat pipe di non dipendere da configurazione che funzionino esclusivamente con la gravità, il ritorno del fluido all'evaporatore può essere comunque compromesso, limitando il flusso termico massimo.
- Range di temperatura ristretto:

Come ogni dispositivo anche l'heat pipe ha un range di temperatura oltre il quale non è più garantito il suo corretto funzionamento. Nel caso del heat pipe questo range è fortemente dipendente dal fluido di lavoro utilizzato. In seguito, metto in evidenza i fluidi di principale utilizzo acqua efficace tra $\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $250\text{ }^{\circ}\text{C}$, ammoniacca fino a $\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$, sodio fino a oltre $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$.

- Sensibilità a fenomeni di contaminazione:
Durante il ciclo può capitare che piccole quantità di gas non si condensino e si accumulino nella zona di condensazione, andando a ridurre l'efficacia dello scambio e causando aumento della resistenza termica.
- Fragilità strutturale e costi di fabbricazione:
Nel caso di microfessure e difetti di fabbricazione il dispositivo sottoposto al vuoto spinto può dimostrarsi fragile. Per questo motivo la fabbricazione richiede processi di saldatura e trattamenti di degasaggio complessi, che hanno come prima conseguenza un aumento del costo rispetto a conduttori massivi.

2.1.4 Analisi letteratura

La tecnologia delle heat pipe rappresenta una soluzione di controllo termico passivo ormai ampiamente consolidata e di comprovata affidabilità nel settore spaziale. Di conseguenza, per questi dispositivi abbiamo a disposizione molta più documentazione rispetto i sensori FBG.

Per quanto riguarda l'integrazione degli heat pipe (HP) in pannelli radiativi possiamo dire che rappresenta una delle soluzioni più note ed affermata per la gestione termica passiva di veicoli spaziali. L'elevata capacità di trasporto di calore, la leggerezza e la possibilità di distribuire in modo uniforme il flusso termico li rendono strumenti ideali per accoppiare i carichi termici interni ai sistemi di dissipazione radiativa verso lo spazio profondo. Studi pionieristici condotti dalla NASA negli anni Settanta e Ottanta (ad esempio Faghri, 1995; Peterson, 1994 [7]) hanno documentato l'uso di HP in radiatori planari, evidenziandone la stabilità in orbita e la possibilità di mantenere gradienti termici inferiori a 2–3 °C lungo superfici di oltre un metro. Ricerche più recenti (Chun et al., 2016; Joudi & Witwit, 2017 [8]) hanno esplorato l'applicazione di HP accoppiati a collettori solari e a strutture planari in alluminio, confermando la loro efficacia in scenari ad alta densità di flusso termico e la capacità di incrementare la vita operativa dei sistemi radiativi rispetto a conduttori metallici convenzionali.

Un ulteriore filone di ricerca riguarda invece il comportamento degli HP in condizioni anomale o di parziale danneggiamento. In ambiente spaziale, microfessurazioni, perdita parziale del fluido di lavoro o alterazioni del wick sono

dei fenomeni che possono rendere inefficienti le prestazioni del dispositivo. Tramite gli studi sperimentali fatti in camera a vuoto di Bienert (Bienert et al., 2005; Ku, 2011) sulla resilienza degli HP sottoposti a stress meccanici e termici si è dimostrato che il sistema riesce ad operare limitatamente grazie alla condizione attraverso la parete metallica e ai residui di fluido intrappolati nelle strutture capillari. I lavori di Maydanik, e Reay & Kew (Maydanik, 2016; Reay & Kew, 2014) hanno invece dimostrato che la perdita di ermeticità o la degradazione del wick abbiano come conseguenza un repentino decadimento delle prestazioni, con un notevole incremento della resistenza termica. Quindi si può riassumere dicendo che l'assenza di gravità permette di eliminare i fenomeni legati all'orientamento ma amplifica altri problemi come la criticità legata all'omogeneità del wick e alla distribuzione del fluido.

2.1.5 Gap di ricerca e motivazione lavoro

Le heat pipe sono dei dispositivi a funzionamento puramente passivo e generalmente non sono dotate di un sistema di monitoraggio dedicato. Questa scelta nasce dal fatto che risulterebbe complessivamente non conveniente sia dal punto di vista economico e sia dal punto di vista tecnico monitorare tali dispositivi. Uno degli obiettivi di questa ricerca è pertanto quello di individuare eventuali condizioni di failure o degrado di tali componenti passivi. Questo obiettivo lo si può raggiungere attraverso una metodologia di misura indiretta e distribuita, basata sull'impiego di sensori a reticolo di Bragg in fibra ottica (FBG) applicati all'intero sistema analizzato. Nel caso specifico, tale approccio viene realizzato mediante la sensorizzazione della piastra radiativa, la quale consente di monitorare il comportamento termico complessivo e di inferire, in modo non invasivo, eventuali anomalie di funzionamento della heat pipe integrata.

2.2 Sensori FBG (Fiber Bragg Gratings)

Il monitoraggio termico e strutturale rappresenta un aspetto cruciale nell'ingegneria aerospaziale, dove l'affidabilità dei sistemi è strettamente legata alla possibilità di rilevare e controllare, in tempo reale, parametri critici come temperatura, deformazione e vibrazioni. Tradizionalmente, la misura di tali grandezze si è basata su sensori elettrici, quali termocoppie, termoresistenze e strain gauge. Tuttavia, la crescente complessità delle strutture aerospaziali, la diffusione dei materiali compositi e la necessità di ridurre peso e cablaggi hanno reso evidente il bisogno di tecnologie di sensing alternative, più leggere, immune ai disturbi elettromagnetici e facilmente integrabili nei materiali. In questo contesto si collocano i sensori a reticolo di Bragg in fibra ottica (Fiber Bragg Gratings, FBG), che negli ultimi due decenni si sono affermati come una delle soluzioni più promettenti per applicazioni critiche sia nel monitoraggio termico che nello Structural Health Monitoring (SHM) [9].

2.2.1 Concetti teorici essenziali

I sensori a reticolo di Bragg in fibra ottica (FBG, Fiber Bragg Gratings) sfruttano il principio della diffrazione di Bragg della luce all'interno di una fibra ottica. Essi sono costituiti da una sezione di fibra, tipicamente di pochi millimetri di lunghezza, nella quale viene inciso un reticolo periodico di indice di rifrazione (variazione periodica dell'indice di rifrazione del core della fibra). Questo reticolo introduce una modulazione spaziale dell'indice del core, caratterizzata da un passo Λ che dà luogo a fenomeni di diffrazione per interferenza costruttiva e distruttiva delle onde luminose che si propagano lungo la fibra.

La condizione di Bragg (2.1) descrive la lunghezza d'onda centrale λ_B che viene riflessa dal reticolo:

$$\lambda_B = 2 \cdot n_{\text{eff}} \cdot \Lambda \quad (2.1)$$

- n_{eff} è l'indice di rifrazione effettivo del modo guidato nel core,
- Λ è il passo del reticolo.

Quando il reticolo viene sottoposto a variazioni di temperatura ΔT o a deformazioni assiali ϵ , sia l'indice di rifrazione effettivo n_{eff} sia il passo Λ

subiscono variazioni. Di conseguenza, la lunghezza d'onda di Bragg riflessa varia in accordo con la relazione (2.2):

$$\Delta\lambda_B / \lambda_B = (1 - p_e) \cdot \varepsilon + (\alpha + \xi) \cdot \Delta T \quad (2.2)$$

- p_e è il coefficiente fotoelastico efficace del materiale,
- α è il coefficiente di dilatazione termica della fibra,
- ξ è il coefficiente termo-ottico (variazione dell'indice con la temperatura),
- ε è la deformazione assiale applicata
- ΔT la variazione di temperatura rispetto alla condizione di riferimento

Questa espressione mostra come un sensore FBG sia intrinsecamente sensibile sia alla deformazione sia alla temperatura. Per applicazioni termiche, ovvero il nostro futuro campo di studio, si tende a minimizzare l'effetto della deformazione, ad esempio vincolando la fibra in modo che non sia soggetta a strain, oppure implementando configurazioni a doppio sensore per compensare il contributo meccanico. In seguito, abbiamo un'illustrazione grafica (Fig. 2.2) del funzionamento dei sensori FBG descritta precedentemente.

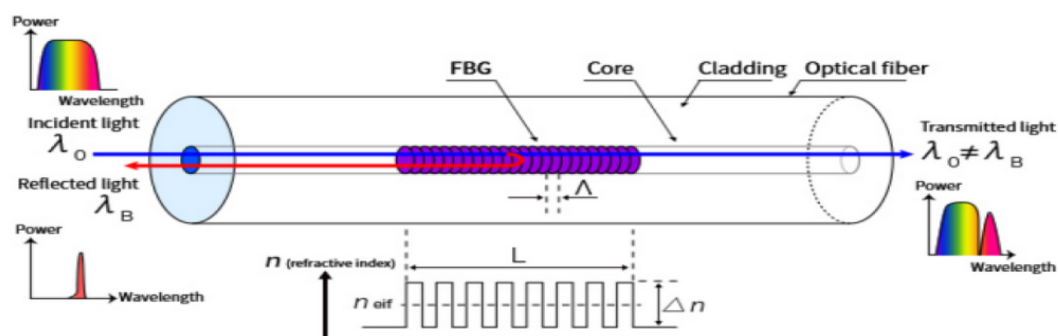


Figura 2.2 Schema funzionamento dei Sensori FBG

2.2.2 Caratteristiche principali

I sensori a reticolo di Bragg in fibra ottica (Fiber Bragg Gratings, FBG) rappresentano una delle tecnologie più promettenti e avanzate per il monitoraggio in tempo reale di parametri fisici, in particolare temperatura e deformazioni meccaniche, in applicazioni sia terrestri che aerospaziali. La loro diffusione crescente è legata a una serie di caratteristiche intrinseche che li rendono

estremamente competitivi rispetto ai sensori tradizionali, soprattutto in contesti che richiedono elevata affidabilità, leggerezza e immunità da disturbi esterni.

Un primo aspetto di rilievo riguarda il peso ridotto e il basso volume occupato: essendo realizzati direttamente all'interno del nucleo di una fibra ottica standard (tipicamente con diametri dell'ordine di $125\ \mu\text{m}$), i sensori FBG non introducono carichi aggiuntivi significativi sulla struttura ospitante. Questa caratteristica risulta cruciale in ambito aerospaziale, dove la minimizzazione delle masse e degli ingombri rappresenta un vincolo progettuale fondamentale. Un altro vantaggio di tali sensori è l'immunità ai disturbi elettromagnetici (EMI). Infatti, al contrario dei sensori elettronici convenzionali questi sensori in fibra ottica non trasmettono informazioni con la corrente elettrica e quindi non necessitano di schermature metalliche ingombranti e pesanti. Questo le permette di essere utilizzate in ambienti ostili con forti campi elettromagnetici o radiofrequenze come nei satelliti, aeromobili o installazioni industriali ad alta potenza. Una altra caratteristica che le rende una tecnologia interessante è l'elevata sensibilità e la risoluzione spettrale. Grazie questa peculiarità noi siamo in grado di leggere piccole variazioni di temperatura o di deformazione che si traducono in spostamenti misurabili della lunghezza d'onda di Bragg riflessa con capacità che raggiungono gli ordini di pochi picometri.

Tale precisione consente di monitorare fenomeni anche di minima entità, risultando particolarmente utile in analisi strutturali o in sistemi di controllo termico ad alta stabilità.

Un elemento che contribuisce in modo significativo alla loro versatilità è la possibilità di implementare tecniche di multiplexing. Su una singola linea in fibra ottica è infatti possibile inserire un elevato numero di reticoli di Bragg, ciascuno caratterizzato da una diversa lunghezza d'onda di Bragg. In questo modo, più punti di misura possono essere monitorati contemporaneamente mediante un'unica connessione ottica, riducendo drasticamente la complessità e i costi del cablaggio, oltre a semplificare l'integrazione all'interno di strutture complesse come pannelli radiativi, componenti aerospaziali o sistemi industriali estesi.

Inoltre, i sensori FBG si distinguono per ulteriori vantaggi: la resistenza a condizioni ambientali ostili (vibrazioni, radiazioni ionizzanti, variazioni di pressione e umidità), la possibilità di misura distribuita lungo la fibra tramite combinazione con altre tecniche ottiche, e la compatibilità con sistemi

optoelettronici compatti e a basso consumo energetico. Queste caratteristiche rendono tale tecnologia molto interessante per missioni spaziali di lunga durata, monitoraggio strutturale (Structural Health Monitoring, SHM) e il controllo termico di satelliti di piccola scala (CubeSat e nanosatelliti).

In sintesi, i sensori FBG [10] offrono una combinazione unica di leggerezza, robustezza, precisione e scalabilità. Questi aspetti li rendono strumenti particolarmente efficaci non solo nel settore spaziale, ma anche in numerosi ambiti ingegneristici e scientifici, dove è richiesto un monitoraggio affidabile e ad alta densità di dati, senza compromessi in termini di massa e integrità strutturale.

2.2.3 Limiti tecnologici

I sensori FBG hanno dei vantaggi importanti ma presentano ancora dei limiti notevoli per poter essere utilizzata come soluzione principale. Innanzitutto, la cross-sensibilità tra temperatura e deformazione obbliga ad avere implementare delle configurazioni ridondanti o algoritmi di compensazione. Questo comporta un aumento di complessità e peso del sistema. Per quanto riguarda la sensibilità possiamo dire che i sensori FBG rispetto ai sensori tradizionali hanno un range operativo molto più limitato. Infine, vista la sua recente diffusione c'è una scarsa documentazione per il quale molti aspetti rimangono ancora oggi oggetto di ricerca come gli ambienti radiativi. Le radiazioni ionizzanti possono alterare l'indice di rifrazione e modificare la risposta spettrale.

2.2.4 Analisi letteratura

Gli studi sui FBG in ambito aerospaziale hanno avuto una forte accelerazione a partire dagli anni 2000. I primi lavori si sono concentrati sull'integrazione in materiali compositi, dimostrando la possibilità di incorporare sensori in fibre di carbonio o vetroresina senza alterare le proprietà meccaniche del laminato. Nel 2006, Dvorak [11] e collaboratori hanno mostrato l'utilizzo di array di FBG per monitorare deformazioni in giunti adesivi di ali in composito, evidenziando la capacità di rilevare precocemente fenomeni di delaminazione.

Negli anni successivi, progetti europei come quelli promossi dall'ESA hanno sperimentato i sensori FBG su strutture reali. Un caso di rilievo è la missione PROBA-II [12], dove gli FBG sono stati utilizzati per misurare temperature e pressioni in un sistema propulsivo, dimostrando accuratezza comparabile o superiore ai trasduttori convenzionali, con il vantaggio di un cablaggio molto ridotto. Parallelamente, la NASA ha condotto test su serbatoi criogenici di idrogeno liquido, utilizzando FBG per monitorare strain e integrità strutturale durante i cicli di riempimento e svuotamento.

Più recentemente, studi come quello di Aimasso et al. (2022) [13] hanno approfondito l'impiego dei sensori FBG per il monitoraggio termico in applicazioni aerospaziali. In tale studio viene analizzata l'integrazione delle fibre ottiche all'interno di strutture radiative, con particolare attenzione alle condizioni operative in ambiente spaziale e alla valutazione della sensibilità e dell'affidabilità della misura.

2.2.5 Gap di ricerca e motivazione lavoro

Dalla quantità di rassegna di lavori sui sensori FBG si dimostra la validità e l'interesse per tale tecnologia. Tuttavia, da questa ricerca è emerso un vuoto applicativo nel loro impiego come strumento di sistema per un monitoraggio complesso delle funzioni di differenti componenti mediante lo sviluppo di una rete di sensori minimamente invasiva. Nello specifico sono carenti lavori di confronti tra misure distribuite ottenute sperimentalmente con sensori FBG con modelli Matlab/Simulink di indagine di trasmissione termica.

Questa tesi si inserisce per compensare questa mancanza andando a creare un banco di prova controllato per verificare l'affidabilità dei sensori FBG nel monitoraggio termico di una piastra radiativa confrontando i risultati sperimentali con quelli ottenuti tramite un modello Simulink in modo da poter prevedere malfunzionamenti o degradi del sistema.

III METODOLOGIA

Il presente capitolo ha lo scopo di illustrare in modo sistematico l'approccio metodologico adottato nello sviluppo della ricerca, delineando il percorso che ha condotto dalla definizione del problema scientifico all'elaborazione dei risultati e alla loro interpretazione critica. La sezione dedicata alla metodologia costituisce quindi l'ossatura del lavoro di tesi, in quanto descrive le scelte concettuali, progettuali e operative che hanno permesso di perseguire gli obiettivi prefissati e di garantire la riproducibilità dell'attività sperimentale e numerica. La sua funzione primaria è quella di esplicitare il "come" della ricerca, mettendo in evidenza le procedure, gli strumenti e i criteri adottati per verificare l'affidabilità dei sensori a reticolo di Bragg in fibra ottica (FBG) in applicazioni di controllo termico passivo per l'ambito aerospaziale.

3.1 Problema di riferimento

La problematica da affrontare nasce dall'esigenza di disporre di tecniche di monitoraggio termico che siano al contempo affidabili, leggere, non invasive e compatibili con le condizioni ambientali spaziali, caratterizzate da forti gradienti termici e dall'assenza di convezione. Le tradizionali soluzioni basate su sensori elettrici, pur ampiamente utilizzate, presentano limiti intrinseci legati alla suscettibilità ai disturbi elettromagnetici e all'incremento di massa e cablaggi. I sensori FBG, grazie alle loro peculiarità di leggerezza, possibilità di multiplexing e immunità ai campi elettromagnetici, si configurano come candidati ideali per rispondere a tali necessità. L'obiettivo della tesi consiste quindi nello sperimentare l'affidabilità e le prestazioni di sensori FBG integrati su una piastra radiativa equipaggiata con heat pipe, in modo da riprodurre scenari rappresentativi delle applicazioni aerospaziali. Accanto all'attività sperimentale, è stato inoltre sviluppato un modello numerico in ambiente Simulink, concepito per riprodurre il comportamento termico del sistema fisico e fornire uno strumento di confronto e validazione dei dati raccolti in laboratorio.

3.2 Percorso Metodologico

Il primo passo metodologico ha riguardato la progettazione del banco prova destinato alle campagne sperimentali. Questa fase ha richiesto un'attenta analisi preliminare finalizzata a definire l'architettura della piastra radiativa e a stabilire le modalità di integrazione del heat pipe e dei sensori termici FBG. Sono state considerate diverse configurazioni di posizionamento, valutando la distanza ottimale tra i reticoli, la necessità di ridondanza delle linee ottiche e le possibili criticità legate a curvature della fibra o a interazioni con il flusso termico. Nel corso dell'attività sperimentale è stata posta particolare attenzione alla riproduzione delle condizioni termiche spaziali, attraverso l'utilizzo di sorgenti di calore controllate e di cicli termici programmabili in grado di simulare le escursioni di temperatura tipiche di una struttura radiativa sottoposta alle fasi di esposizione e di eclissi solare in orbita. Per simulare invece le condizioni di isolamento termico proprie dell'ambiente spaziale, la piastra è stata inserita all'interno di un involucro isolante, concepito per minimizzare gli scambi convettivi tra la sua superficie e l'ambiente circostante. Tale configurazione ha permesso di riprodurre, seppur in maniera parziale, il comportamento termico del sistema in condizioni di vuoto termico. Questa fase di progettazione si è rivelata determinante per assicurare che il banco di prova fosse in grado di fornire dati affidabili e rappresentativi di scenari operativi realistici.

Conclusa la progettazione si è passati all'assemblaggio del banco sperimentale. In questa sezione si parte con la descrizione dei materiali, degli strumenti utilizzati e delle modalità di installazione dei sensori. La piastra radiativa è stata simulata con un semplice pannello d'alluminio su cui è stato disposto un heat pipe in rame/acqua che ha il compito di emulare il comportamento di un dispositivo passivo di smaltimento termico. Per quanto riguarda le fibre ottiche FBG sono state implementate sul pannello tramite tecniche di fissaggio e protezione meccanica per assicurarsi stabilità e rispetto del raggio minimo di curvatura.

Il sistema che ha il compito di creare la sorgente termica controllabile è composto dall'iterazione di diversi dispositivi. Infatti, esso è costituito da una cartuccia elettrica gestita da un microcontrollore programmabile tramite un codice Arduino. Questo ci permette di avere dei profili termici controllabili e ripetibile, requisito necessario per poter confrontare i test in modo affidabile. Per l'acquisizione dei

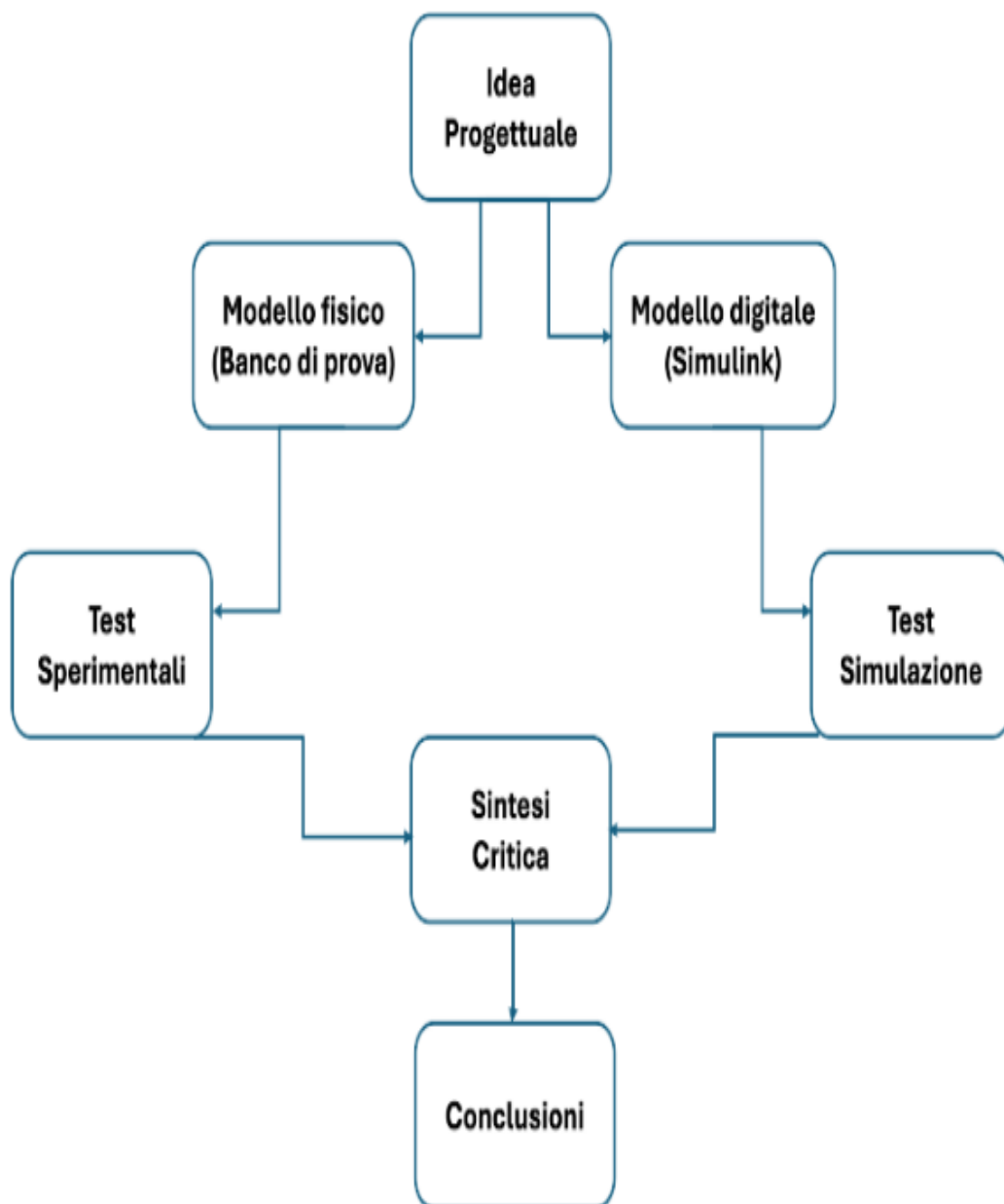
dati si utilizza l'interrogatore ottico che ha il compito di monitorare continuamente la lunghezza d'onda riflessa sui sensori FBG. Questo macchinario ci restituisce la variazione istantanea della lunghezza d'onda da cui dovremmo però ricavare la corrispondente temperatura istantanea. Per ottenere ciò bisogna fare una taratura tramite la camera climatica.

Terminata la descrizione dell'apparato, l'attività metodologica ha previsto lo svolgimento delle prove sperimentali e l'elaborazione dei dati acquisiti. L'analisi dei risultati si è basata sulla conversione degli spostamenti spettrali in corrispondenti variazioni di temperatura e sulla loro comparazione con i valori forniti dai sensori di riferimento. Particolare attenzione è stata rivolta all'analisi della sensibilità dei reticoli, alla stabilità della risposta su cicli termici ripetuti e alla capacità del sistema di rilevare eventuali fenomeni di non uniformità termica sulla piastra.

In parallelo alle prove sperimentali è stato sviluppato un modello numerico del sistema realizzato in ambiente Simulink, fondato su un approccio a rete termica concentrata. Il modello consente di rappresentare i principali elementi del sistema — evaporatore, condensatore, tratto adiabatico-radiale della heat pipe e piastra radiativa — tramite l'introduzione di resistenze termiche equivalenti, impiegate per descrivere i processi di conduzione assiale e radiale e gli scambi di calore con l'ambiente circostante. Le proprietà termofisiche dei materiali sono state ottenute a partire da fonti bibliografiche e datasheet tecnici, mentre le condizioni al contorno sono state definite in coerenza con i profili termici applicati durante le prove sperimentali.

Questo modello ha rappresentato un supporto fondamentale per interpretare la risposta termica complessiva del sistema e per condurre un'analisi comparativa con i dati sperimentali. Questo lavoro di ricerca si conclude con un confronto diretto tra i risultati numerici e le misure sperimentali. Questo confronto ha permesso di valutare in modo approfondito l'affidabilità dei sensori FBG riguarda la precisione della misurazione.

In seguito, viene presentato uno schema concettuale che sintetizza in forma grafica il percorso metodologico seguito nello sviluppo del lavoro di tesi, evidenziando la sequenza logica delle attività svolte e i collegamenti funzionali tra le diverse fasi di analisi, sperimentazione e validazione.



IV. APPARATO SPERIMENTALE

In questo capitolo viene descritto l'apparato sperimentale sviluppato per la caratterizzazione termica dei sensori a reticolo di Bragg in fibra ottica (FBG) integrati su una piastra radiativa con heat pipe. Dopo una panoramica sugli obiettivi delle prove, verranno illustrate in modo dettagliato i materiali e le geometrie impiegate, le soluzioni costruttive adottate, i sistemi di misura e di acquisizione dati, nonché le procedure sperimentali definite per simulare scenari rappresentativi di applicazioni aerospaziali. La descrizione è strutturata in maniera tale da consentire la completa replicabilità del setup e delle prove, rendendo possibile la ripetizione degli esperimenti in autonomia da parte di altri operatori o in differenti contesti di ricerca.

L'apparato sperimentale di tale ricerca è stato sviluppato con l'obiettivo di verificare l'affidabilità e le prestazioni termiche di sensori a reticolo di Bragg in fibra ottica (FBG) integrati in un sistema radiativo con heat pipe. La prima fase corrisponde dunque valutare quali sono i materiali necessari per simulare al meglio le condizioni previste da tale apparato sperimentale.

4.1 Scelta del materiale

4.1.1 Heat pipe

Produttore: Wakefield-Vette

Codice modello: 121725_rev1

Tipologia: Flat Heat Pipe (diametro appiattito 4,5 mm)



Figura 4.1 Immagine heat pipe flat 121725

La scelta di adottare heat pipe trasversale come elemento di gestione termica nel banco prova risulta coerente con le esigenze di simulazione di un sistema radiativo per applicazioni aerospaziali. L'impiego di un heat pipe a wick capillare consente il ritorno del fluido indipendentemente dall'orientamento e dalla presenza di gravità, caratteristica indispensabile per il funzionamento in ambiente di vuoto spaziale. L'heat pipe è stato scelto piatto in modo che possa massimizzare la superficie di contatto con la piastra radiativa. Questa configurazione permette anche di ridurre la resistenza termica di interfaccia e favorisce un'efficace dissipazione del calore della piastra. La dimensione nasce tra un compromesso tra un heat pipe in grado di smaltire la potenza termica senza che il dispositivo risultasse ingombrante. Come fluido di lavoro è stata adottata l'acqua, grazie all'elevata capacità termica specifica, alla conducibilità termica favorevole e alla stabilità chimica nell'intervallo di funzionamento. Inoltre, il range operativo compreso tra 30°C e 120 °C si colloca perfettamente nelle condizioni previste dal banco prova, assicurando un funzionamento stabile e rappresentativo. In questo modo, la combinazione tra piastra radiante e heat pipe garantisce una distribuzione uniforme della temperatura, condizione essenziale per la validazione dell'affidabilità e della risposta dei sensori FBG.

Scheda Tecnica Riassuntiva 121725_rev1

- **Codice modello:** 121725_rev1
- **Lunghezza:** 100 mm
- **Sezione (L × W × T):** ~10,4 × 4,5 mm
- **Materiale:** Rame
- **Fluido di lavoro:** Acqua
- **Wick:** Sinterizzato
- **Range operativo:** 30–120 °C
- **Potenza trasportabile:** 25–30 W
- **Resistenza termica:** < 0,06 K/W

4.1.2 Involucro isolante termico

Produttore: Fischer

Codice modello: PU 1K750

Tipologia modello: Schiuma poliuretanica manuale

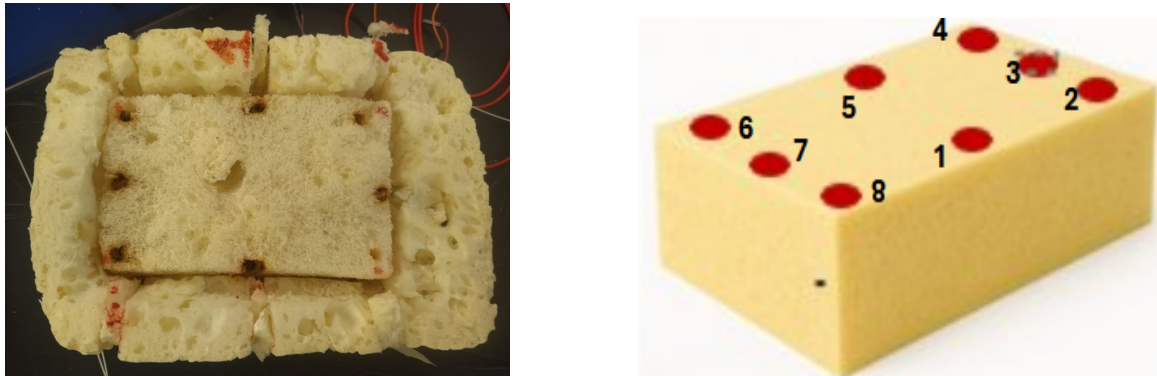


Figura 4.2 Immagine reale e digitale involucro isolante termico

Gli aspetti maggiormente rilevanti che hanno determinato la scelta di questo isolante riguardano principalmente le sue proprietà termo-fisiche e le caratteristiche di applicazione. La schiuma poliuretanica presenta infatti una bassa conducibilità termica pari a circa $0,035 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, che la rende idonea a garantire un efficace isolamento e a limitare le perdite di calore. A ciò si aggiunge un ampio intervallo di temperatura operativa, da -40°C a $+90^{\circ}\text{C}$, che consente l'utilizzo del materiale anche in condizioni termiche elevate, in linea con i requisiti previsti per il banco di prova. La natura espansa della schiuma ha inoltre permesso di ottenere un modello rappresentativo della potenziale piastra radiativa integrata con heat pipe, assicurando al tempo stesso tempi di indurimento contenuti.

Per l'analisi del comportamento termico della piastra è stata definita, in fase progettuale, una rete di otto punti di indagine considerati strategici. Quattro di essi coincidono con le posizioni dei sensori FBG (due dei quali collocati alle estremità dell'heat pipe, al fine di monitorare con precisione le condizioni operative nelle sezioni di evaporatore e condensatore) mentre gli altri quattro sono distribuiti negli angoli dell'involucro rettangolare per caratterizzare la risposta termica periferica. Tale configurazione consente di ottenere una mappatura completa del campo termico della piastra, correlando le misure acquisite in zone centrali e marginali. I fori non impiegati durante le prove vengono opportunamente sigillati

con tappi isolanti, così da evitare dispersioni indesiderate e assicurare la ripetibilità e l'affidabilità dei risultati sperimentali.

Scheda Tecnica riassuntiva - PU 1K 750

- **Tipologia:** Schiuma poliuretanica monocomponente manuale (750 ml)
- **Resa:** 35 litri schiuma libera
- **Densità (indurita):** 20-30 g/cm³
- **Conducibilità termica :** 0.035 W/m*K
- **Range di applicazione:** +5 °C - +35 °C
- **Range di esercizio:** : -40 °C - +90 °C
- **Reazione al fuoco:** B3(DIN 4102-2)

4.1.3 Piastra radiativa

Per simulare il comportamento di una piastra radiativa è stato deciso di impiegare una piastra in alluminio EN AW-1050A di dimensioni contenute. Tale alluminio è infatti un materiale caratterizzato da elevata conducibilità termica e bassa densità, proprietà che lo rendono ideale per riprodurre l'efficienza di distribuzione del calore tipica dei sistemi radiativi in ambito aerospaziale, garantendo al contempo leggerezza e semplicità di manipolazione. Per le geometrie si è optato di utilizzare delle dimensioni ridotte che consentono di semplificare la gestione sperimentale, riducendo i tempi di riscaldamento e raffreddamento, ottimizzando il consumo energetico e favorendo una più rapida acquisizione dei dati.

Scheda tecnica riassuntiva – Piastra in Alluminio EN AW-1050A

- **Designazione:** EN AW-1050A
- **Norma di riferimento:** UNI EN 573-3
- **Lunghezza (L_p):** 0.10 m
- **Spessore(h_p):** 0.0005 m
- **Larghezza(b_p):** 0.15 m
- **Densità:** 2700 kg/m³

- **Calore specifico:** 896.9 J/(kg*K)
- **Conducibilità termica (k_p):** 237 W/(m*K)

4.1.4 Sensori FBG

La fibra ottica utilizzata è una fibra monomodale da 250 μm , comprendente core, cladding e coating (125 (core e cladding)+125 (coating)). Questa configurazione è tipicamente impiegata nei sensori FBG per la sua affidabilità e versatilità. Infatti, tale dimensione rappresenta un compromesso ottimale tra robustezza e integrabilità: fibre di diametro inferiore risulterebbero troppo fragili mentre diametri maggiori renderebbero complessa l'integrazione, rischiando di compromettere l'integrità del materiale ospitante. La scelta di 250 μm assicura quindi una buona resistenza meccanica, facilità di installazione e stabilità termica.

Scheda riassuntiva tecnica -sensore FBG ITU-T G.652.D

- **Tipo di fibra:** monomodale (Single Mode Fiber, SMF)
- **Standard di riferimento:** ITU-T G.652.D
- **Diametro del core:** $\sim 8\text{--}10\ \mu\text{m}$
- **Diametro del cladding:** 125 μm
- **Diametro del coating (rivestimento secondario):** 250 μm
- **Materiale del core e del cladding:** silice drogata
- **Materiale del coating:** doppio strato di acrilato o polimero protettivo
- **Lunghezze d'onda operative:** 1310 nm e 1550 nm
- **Dispersione di polarizzazione (PMD):** $\leq 0,1\text{--}0,2\ \text{ps}/\sqrt{\text{km}}$
- **Raggio minimo di curvatura:** $\sim 25\ \text{mm}$ (dipende dal tipo di fibra)
- **Intervallo di temperatura operativa:** da $-20\ ^\circ\text{C}$ a $+70\ ^\circ\text{C}$
- **Resistenza alla trazione:** fino a 5 N (fibra nuda) o superiore se integrata in cavo
- **Indice di rifrazione del core:** $\sim 1,467$
- **Indice di rifrazione del cladding:** $\sim 1,462$

4.2 Progettazione e procedure di integrazione

Lo step successivo alla selezione dei materiali consiste nella creazione del banco di prova. Tale fase comprende inizialmente la progettazione della configurazione ottimale dell'heat pipe e dei sensori FBG sulla piastra d'alluminio.

4.2.1 Definizione della configurazione ottimale

La piastra deve essere integrata con due elementi distinti: Heat Pipe e i sensori FBG. Per quanto riguarda l'heat pipe, possiamo dire che l'heat pipe è stato integrato trasversalmente al centro della piastra, in direzione perpendicolare al lato maggiore. Tale configurazione è stata scelta al fine di garantire una distribuzione termica più uniforme lungo l'intera superficie radiante, riducendo i gradienti longitudinali e migliorando l'efficienza del trasferimento di calore. Il posizionamento centrale consente inoltre di massimizzare l'interazione tra la sorgente termica e l'elemento di dissipazione, fornendo una condizione sperimentale rappresentativa del funzionamento di una piastra radiativa in applicazioni aerospaziali.

Per l'integrazione tra la piastra e il sensore a fibra ottica a reticolo di Bragg (FBG), c'è stata un'analisi molto più dettagliata. La scelta iniziale riguarda la determinazione del numero di linee da implementare sulla piastra, variabile da 1 a 4. L'adozione di una singola linea consente di ottenere una struttura compatta e di semplice assemblaggio; tuttavia, comporta il collegamento in serie dei quattro sensori. Questa configurazione presenta dunque una criticità intrinseca: la rottura della fibra compromette l'integrità del sistema di misura, determinando la perdita dei dati provenienti da tutti i sensori situati a valle del punto di guasto. L'implementazione di quattro linee indipendenti conferisce al sistema una maggiore affidabilità strutturale, riducendo il rischio di perdita totale dei dati in caso di guasto. Tuttavia, questa configurazione presenta un interesse applicativo limitato a causa della complessità di integrazione e dell'aumento dei requisiti in termini di spazio e connettività. In seguito, sono illustrate delle potenziali implementazioni rispettivamente con 1-2-3-4 linee:

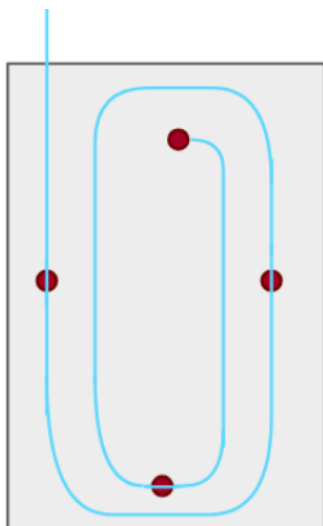


Figura 4.3: Una linea di fibra

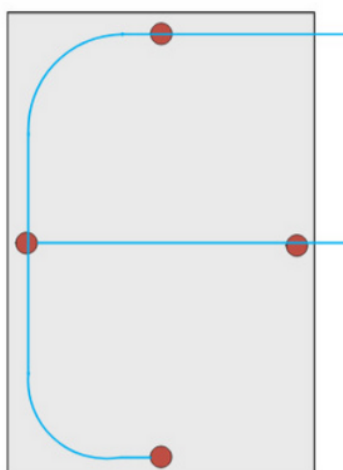


Figura 4.4: Due linee di fibre

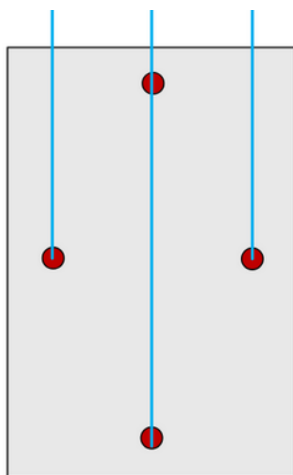


Figura 4.5: Tre linee di fibre

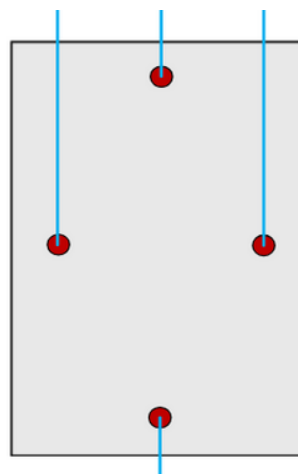


Figura 4.6: Quattro linee di fibre

A seguito di un'analisi approfondita, è stata selezionata una configurazione a due linee, al fine di garantire la continuità operativa del sistema in caso di guasto di una delle fibre, evitando al contempo un'eccessiva ridondanza che avrebbe compromesso l'interesse applicativo della soluzione. A seguire ho analizzato diverse configurazioni a due linee che tenessero conto delle limitazioni fisiche imposte sia dal processo di saldatura sia dalle caratteristiche meccaniche della fibra stessa. Nello specifico la macchina per la saldatura della fibra ottica richiede un lembo minimo di 5 cm di fibra per lato da saldare al fine di ottenere una giunzione adeguata. Questo comporta di conseguenza una distanza minima tra i due sensori di circa 10 cm. Inoltre, dal punto di vista strutturale, la fibra ottica è

sensibile agli stress da flessione, rendendo necessario il rispetto di un raggio di curvatura minimo di 5 cm per evitare il rischio di danneggiamento e perdita di funzionalità. Per queste ragioni, la configurazione a sinistra è stata esclusa e si è optato per l'adozione della configurazione a destra.

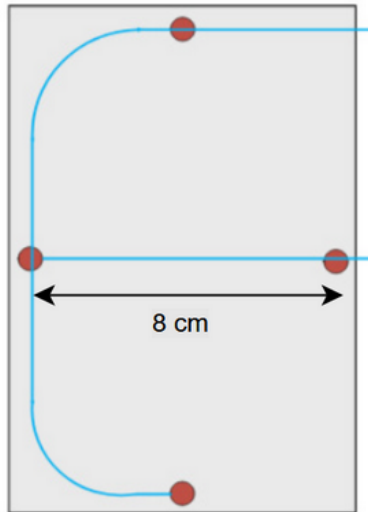


Figura 4.7 Opzione scartata

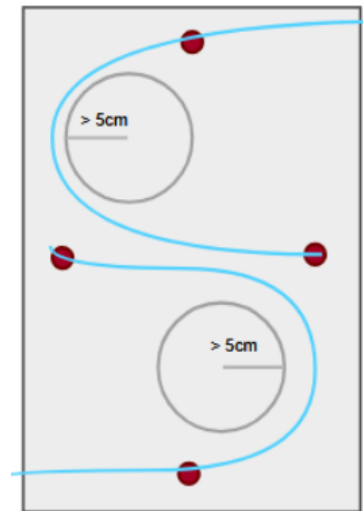


Figura 4.8 Opzione adottata

La configurazione finale è stata progettata per soddisfare i requisiti fisici relativi sia alla flessione della fibra, garantendo raggi di curvatura superiori a 5 cm, sia alla distanza minima di 10 cm tra due sensori, necessaria per il processo di saldatura. Inoltre, in questa configurazione, la fibra ottica è disposta lungo l'asse longitudinale della heat pipe, consentendo l'acquisizione di dati più affidabili e rappresentativi del comportamento termico del sistema.

4.2.2 Processo di saldatura

Una volta definita la configurazione, si procede con l'ottenimento della lunghezza della fibra nelle dimensioni specificate. Il processo di saldatura della fibra ottica prevede, in via preliminare, la rimozione del coating dal lembo di fibra da saldare, garantendo un margine minimo di 5 cm per ciascun lembo. In seguito, si utilizza un taglierino di precisione per eseguire il taglio delle estremità con una precisione angolare prossima ai 90°. Qualora vengano rispettati questi requisiti, la macchina salda le due estremità, assicurando la continuità tra il connettore e i due sensori con la lunghezza corretta della fibra per l'assemblaggio successivo sulla piastra.

Prima di procedere con il posizionamento della fibra sulla piastra, è necessario applicare un rivestimento protettivo sulla sezione che resterà esposta al di fuori della piastra. Tale rivestimento consiste in un tubo polimerico all'interno del quale la fibra viene fatta scorrere fino al raggiungimento delle dimensioni desiderate. Successivamente, mediante l'impiego di una pistola termica, il coating viene riscaldato in modo che aderisca in maniera uniforme alle pareti esterne della fibra, garantendo così una maggiore resistenza agli stress meccanici.

4.2.3 Processo di integrazione

Dopo il processo di saldatura, la fibra ottica è stata integrata sulla piastra di alluminio mediante l'impiego di Kapton, adesivo termo-resistente scelto per la sua stabilità alle temperature operative e per l'ottima adesione alla superficie metallica. L'adesivo è stato applicato lungo il tracciato della fibra, escludendo le aree corrispondenti ai sensori per evitarne alterazioni dovute a tensioni residue. Nei punti in cui sono disposti i sensori si è optato per la pasta termica ARCTIC AC MX-4 ad alta conducibilità; materiale che garantisce un efficace trasferimento del calore tra la piastra e i sensori. L'obiettivo è quello di simulare la condizione di una fibra inglobata direttamente nel materiale che restituisca delle misurazioni termiche affidabile e rappresentativa.



Figura 4.9 Kapton



Figura 4.10 pasta termica ARTIC AC MX-4

L'heat pipe è disposta al centro del lato opposto della piastra in modo che eviti di creare tensioni residue sui sensori che potrebbero falsare i risultati finali. Per integrare l'heat pipe si è deciso di utilizzare un biadesivo ad alte prestazioni progettato per resistere ad alte temperature. Il biadesivo rispetto le altre soluzioni di fissaggio riduce le sollecitazioni meccaniche localizzate, distribuisce in modo omogeneo i carichi ed elimina la formazione di microvuoti che potrebbero

ostacolare il trasferimento di calore. Infine, ha una ottima resistenza al degrado termico anche per condizioni di cicli ripetuti come nel nostro caso. In una prova in cui sono richiesti leggerezza, compattezza e stabilità dimensionale questa soluzione si dimostra essere una scelta valida.



Figura 4.11 Lato Heat Pipe

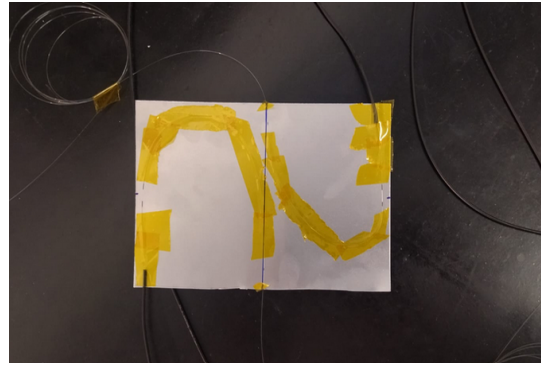


Figura 4.12 Lato sensori FBG

4.2.4 Mappa dei sensori

Per garantire coerenza e tracciabilità tra i diversi campionamenti, i connettori sono stati numerati in modo univoco. Questa numerazione consente di associare correttamente ciascun connettore ai relativi sensori, riducendo il rischio di errori nell'analisi e facilitando il confronto tra le misurazioni effettuate in differenti sessioni di test. A tal fine, è stata predisposta una tabella che classifica i sensori di ciascuna linea, distinguendoli tra quelli posizionati all'interno della heat pipe e quelli esterni ad essa. Ogni sensore è stato identificato mediante un codice alfanumerico nel formato CHxxGRyy, dove:

- xx indica la linea di appartenenza (valori compresi tra 01 e 04);
- yy rappresenta il picco di riferimento, con 01 corrispondente a 1540 nm e 02 a 1530 nm.

Questa codifica assicura un'organizzazione chiara e sistematica dei sensori, facilitando l'analisi e la correlazione dei dati acquisiti. Considerando la tipologia della linea e la posizione del sensore (interno o esterno all'heat pipe), è possibile procedere alla sua identificazione utilizzando la seguente tabella:

Piastra on nominal	Sensore esterno HP	Sensore interno HP
Linea 1	CH01GR01 (1540)	CH01GR02 (1530)
Linea 2	CH02GR01 (1540)	CH02GR02 (1530)

Piastra off nominal	Sensore esterno HP	Sensore interno HP
Linea 3	CH03GR02 (1530)	CH03GR01 (1540)
Linea 4	CH04GR02 (1530)	CH04GR01 (1540)

Per agevolare un'identificazione più chiara, è stata effettuata la rappresentazione grafica dei sensori anche nella zona sovrastante le piastre.

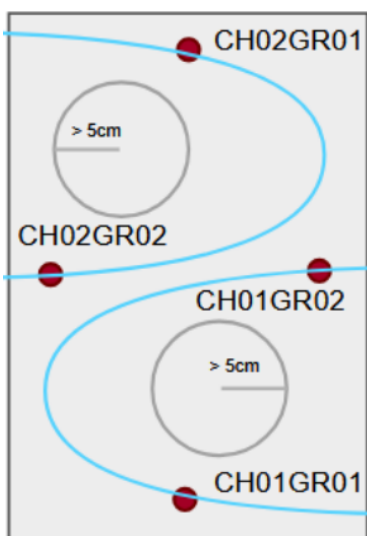


Figura 4.13 Configurazione on nominal

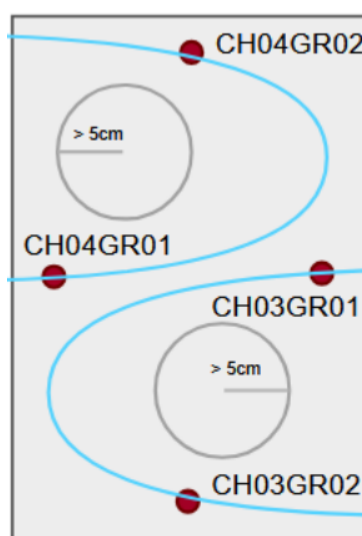


Figura 4.14 Configurazione off nominal

4.3 Caratterizzazione termica dei sensori

4.3.1 Set up camera climatica

Completato l'assemblaggio, è stata effettuata una verifica del corretto funzionamento dei sensori termici FBG. Per tale scopo, è stato deciso di sottoporre le piastre a cicli termici all'interno di una camera climatica. Questo strumento è progettato per simulare e controllare condizioni ambientali specifiche, quali temperatura e umidità, al fine di testare il comportamento e l'affidabilità dei dispositivi in condizioni variabili e ripetibili.

Il setup della camera prevedeva cinque variazioni di temperatura di 10°C ciascuna, all'interno di un intervallo compreso tra 20°C e 60°C. Tale intervallo è stato scelto al fine di evitare di sottoporre la fibra a escursioni termiche eccessive. Ogni variazione termica aveva una durata di 30 minuti e il ciclo è stato ripetuto 11 volte per garantire una sufficiente affidabilità dei dati raccolti.

4.3.2 Acquisizione dei dati e grafici taratura

Dopo diverse ore di ciclo termico, sono stati acquisiti numerosi dati tramite i sensori termici, collegati ad un interrogatore esterno alla camera. Tali dati sono stati archiviati in quattro file distinti:

20250311-1544_taratura_termica(Acquisizione_Interrogatore)"2025-03-11.DAT", "2025-03-12.DAT", "2025-03-13.DAT" (Acquisizione_C.Climatica).

I file ottenuti da questo processo sono stati dati come input ad un codice Matlab di taratura termica denominato "Taratura_piastra02.m", che ha permesso di estrarre informazioni sulla risposta dei sensori alle variazioni termiche imposte dalla camera climatica. Infatti, il codice richiede in input il file e le condizioni ambientali e dai in output tre grafici rappresentativi dell'andamento termico dei sensori. Sulla base di questi grafici possiamo valutare il funzionamento dei sensori e l'incremento della lunghezza d'onda in funzione di un aumento di temperatura. In seguito, verranno illustrati e commentati tali grafici.

Il primo grafico generato dall'esecuzione del codice è il seguente:

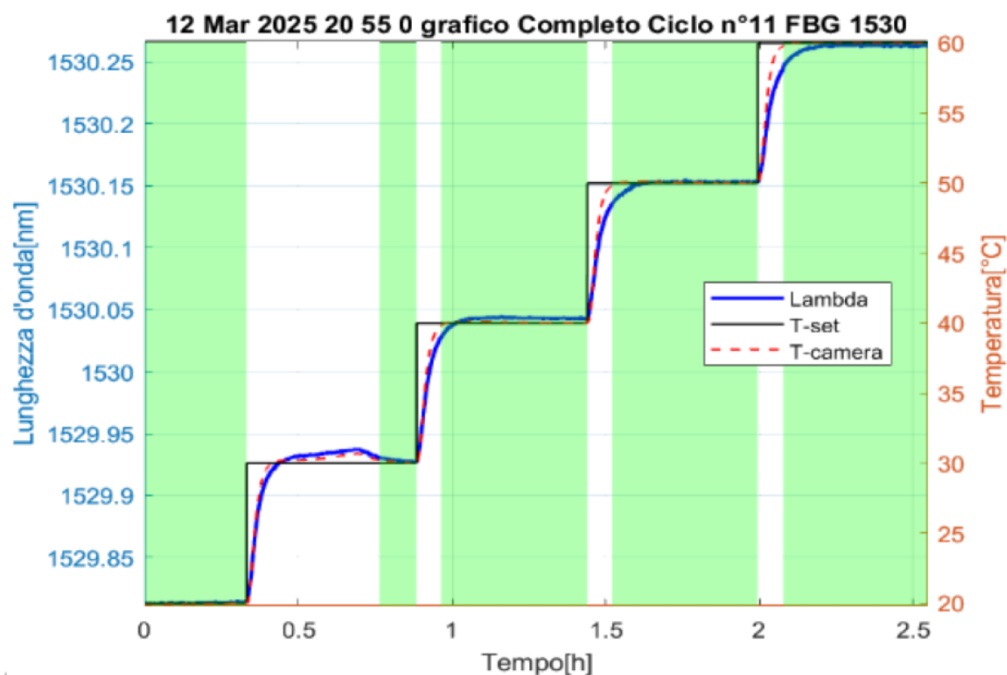


Grafico 4.15 Set camera climatica e sensori FBG

Il grafico presenta l'andamento della temperatura [°C] in funzione del tempo [h] rilevata dal sensore FBG durante il ciclo 11, evidenziando tre serie di dati. La linea nera a scalino rappresenta il set-up impostato sulla macchina, a cui dovranno fare riferimento gli altri due andamenti. La linea rossa corrisponde alla temperatura registrata dal sensore della camera climatica, la linea blu riporta i valori rilevati dal sensore della fibra ottica. La congruenza tra le tre serie di dati conferma il corretto funzionamento della fibra in corrispondenza dei diversi intervalli di temperatura.

Osservando il grafico si può notare inoltre che i valori più affidabili sono in condizioni di regime stazionario mentre nella fase transitoria si denota meno affidabilità. Questo ritardo è dovuto al fatto che i sensori della camera misurano la temperatura dell'aria della camera climatica mentre i sensori sulla piastra leggono la temperatura della piastra in alluminio che per fenomeni di trasmissione di calore comporta dei ritardi.

Le colonne verdi rappresentano le zone in cui la differenza istantanea tra la temperatura letta dai sensori della camera e la temperatura letta dai sensori FBG è inferiore a 1°C. Queste bande verdi evidenziano a loro volta che le maggiori incertezze di lettura si riscontrano intorno ai 20°C, temperatura vicina alla

temperatura ambiente sulla quale la stessa camera climatica fa fatica a mantenere una temperatura costante. Il secondo grafico generato dal codice è il seguente:

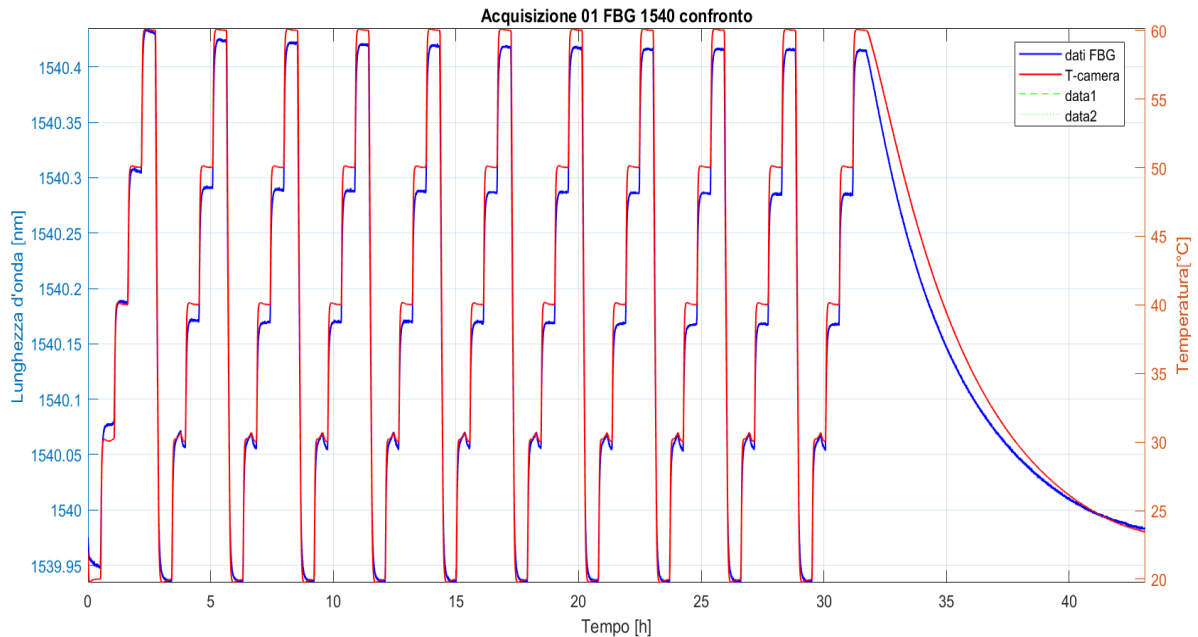


Figura 4.16 Verifica ripetibilità 11 cicli

Il grafico consente di confrontare il comportamento rilevato dal sensore FBG 1540 e dal sensore della camera termica tra i 12 cicli analizzati. L'andamento ripetitivo osservato evidenzia la consistenza e l'affidabilità dei dati acquisiti, requisito indispensabile per poter proseguire con la campagna di test sperimentali.

Il terzo grafico generato dal codice è il seguente:

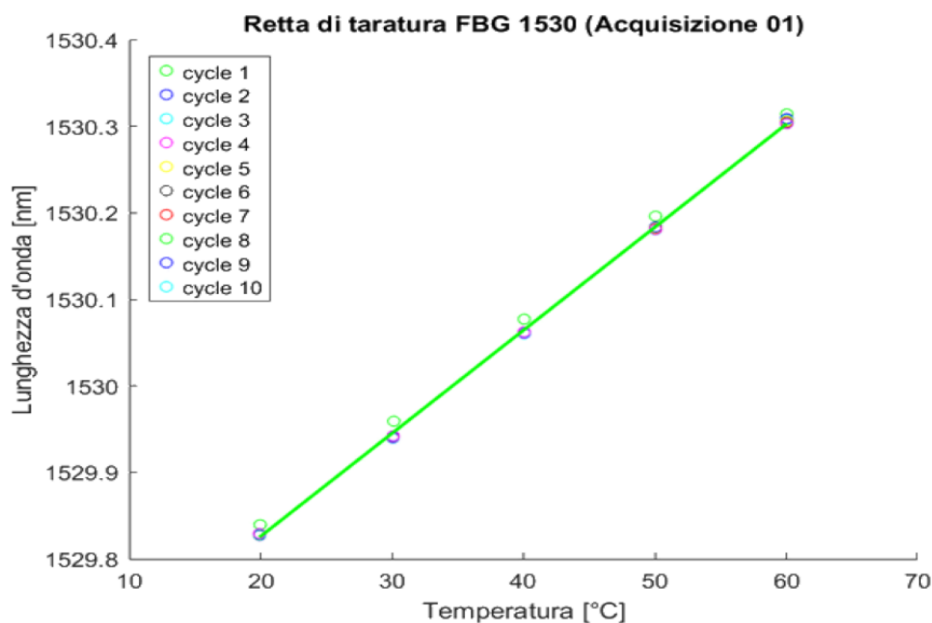


Figura 4.17 Taratura termica sensori FBG

Nell'ultimo grafico vengono rappresentate, mediante simboli circolari, le lunghezze d'onda del sensore FBG 1530 misurate a specifiche temperature (20°C, 30°C, 40°C, 50°C, 60°C). I cerchi, codificati per colore, distinguono i risultati ottenuti nei diversi cicli. Il cerchio verde, relativo al primo ciclo, si discosta significativamente dagli altri valori. Tale fenomeno è attribuibile a un controllo dell'umidità della camera climatica, che nelle prime fasi dei test risulta essere meno sensibile. Per questo motivo escluderemo il primo ciclo e andiamo ad interpolare i risultati ottenuti nei cicli successivi. Questo processo di calcolo consente di evidenziare graficamente la relazione lineare tra l'incremento della temperatura e l'aumento della lunghezza d'onda. Di seguito sono riportati il coefficiente angolare e il termine noto delle rette ottenute dall'analisi dei dati registrati dai singoli sensori.

1	FBG 140(A 06)	[0.0119 , 1.5397e+03]
2	FBG 130(A 06)	[0.0111, 1.5296 e+03]
3	FBG 140(A 06)	[0.0122, 1.5398 e+03]
4	FBG 130(A 06)	[0.0111, 1.5296 e+03]
5	FBG 142(A 06)	[0.0102, 1.5420 e+03]
6	FBG 130(A 06)	[0.0124, 1.5295 e+03]
7	FBG 140(A 06)	[0.0113, 1.5398 e+03]
8	FBG 130(A 06)	[0.0119, 1.5296 e+03]

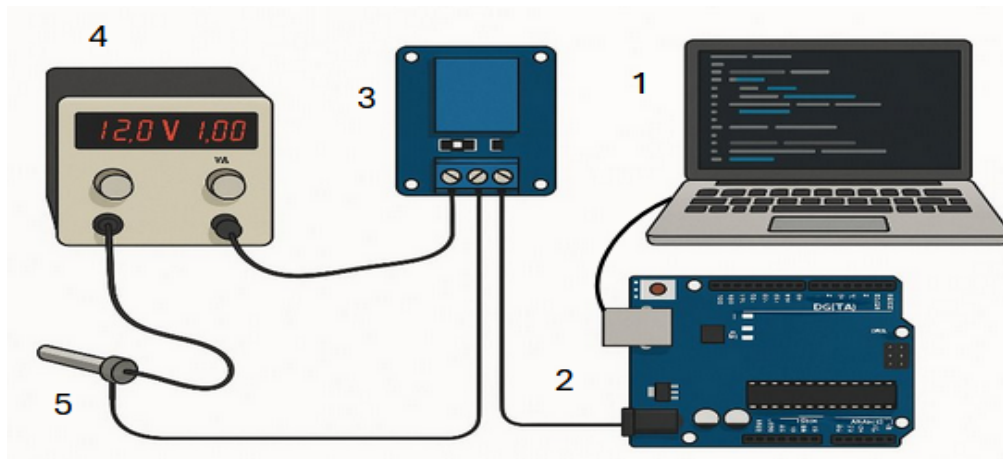
Conoscendo la lunghezza d'onda restituita dal sensore possiamo ricavare la temperatura letta dalla fibra. Questo consente di ottenere il profilo termico della piastra in presenza di una sorgente di calore esterna. Con questi dati dovremmo poi risalire alla posizione e intensità della fonte di calore.

4.4 Applicazione sorgente termica

L'apparato sperimentale è progettato per valutare le capacità di un sistema di sensori FBG di individuare e quantificare l'intensità di una sorgente termica applicata al sistema stesso. Per questo motivo, è necessario disporre di un dispositivo in grado di emulare una sorgente di calore esterna. L'emulazione è realizzata attraverso l'integrazione di più componenti: una resistenza elettrica di riscaldamento (cartuccia termica), un alimentatore in corrente continua, un microcontrollore Arduino, un modulo relè e un computer di gestione.

Per il controllo della sorgente termica si esegue in primo luogo il codice scritto su Arduino che a sua volta invia un segnale al microcontrollore fisico. Questo segnale comanda la percentuale di duty cycle con il quale l'Arduino fisico regola conseguentemente il relè. Il relè oltre ad essere collegato all'Arduino è interfacciato sia ad un alimentatore da cui ricava la potenza elettrica sia alla cartuccia termica che per effetto Joule si riscalda ottenendo la nostra sorgente termica controllata. Infatti, in questo modo si ottiene un sistema di riscaldamento a potenza variabile in grado di riscaldare una resistenza termica in modo ciclico e costante.

Di seguito è riportato lo schema dell'architettura del sistema, che consente di evidenziare in maniera chiara e distinta i singoli componenti e le relative interconnessioni funzionali.



- | | |
|-----------------------|---------------------------|
| 1 Computer (Codice) | 2. Arduino |
| 3. Relè Digitale | 4. Alimentatore (12 V 1A) |
| 5. Resistenza termica | |

4.4.1 Computer (Codice Arduino)

L'intero processo ha origine dal codice implementato sul computer, il quale genera il segnale di input necessario all'attivazione del sistema e alla conseguente gestione della sorgente termica. Per regolare correttamente la resistenza termica è stato deciso di affidarci ad un codice basato sul metodo del duty cycle. Il duty cycle è una misura che indica la frazione di tempo in cui un segnale è attivo (o in stato "on") rispetto al periodo totale di un ciclo. Si esprime comunemente in percentuale e si calcola come il rapporto tra il tempo in cui il segnale è attivo e il tempo totale di un ciclo.

Per poter scrivere il codice bisogna prima di tutto ricavarsi la frequenza di commutazione. Per calcolare la frequenza di commutazione bisogna prima ricavarsi il modello teorico con cui creare il modello simulink da cui si ottiene la frequenza di commutazione.

Per poter ricavare tale parametro bisogna partire da un'approfondita analisi delle dinamiche fisiche della resistenza termica che successivamente implementeremo in un modello Simulink. Il modello teorico parte con lo studio del flusso termico Q scambiato attraverso la superficie esterna S per effetto della differenza tra temperature esterna T_e ed interna T_i che può essere espresso:

$$Q = hS(T_e - T_i) \quad (4.1)$$

Il flusso termico Q che il corpo scambia con l'ambiente esterno (il suo segno varierà in funzione delle temperature T_e e T_i), e che entra nel corpo, ne altera la temperatura interna T_i nel tempo secondo la legge:

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{hS}{mc}(T_e - T_i) \quad (4.2)$$

Dall'ultima equazione si ricava l'equazione di equilibrio termico:

$$T_e = T_i + \frac{m \cdot c}{h \cdot S} \cdot \frac{dT_i}{dt} \quad (4.3)$$

Con lo studio delle unità di misura si ottiene che l'unità di misura del coefficiente della derivata prima della Temperatura T_i rispetto al tempo sono i secondi. Questo coefficiente rappresenta il rapporto tra la capacità termica del corpo ($m \cdot c$) e la sua conduttanza termica ($S \cdot h$), quindi, ricordando che l'inverso di una conduttanza è una resistenza, può essere pensato come il prodotto della capacità termica del corpo per la sua resistenza, ovvero:

$$C = m \cdot c \quad R = \frac{1}{h \cdot S} \quad (4.4) \quad (4.5)$$

Allora, in analogia con i circuiti elettrici, il prodotto $R \cdot C$ definisce la costante di tempo termica del sistema e viene solitamente indicato con τ :

$$\tau = \frac{m \cdot c}{h \cdot S} \quad (4.6)$$

Quindi la formula può essere riscritta come:

$$T_e = T_i + \tau \frac{dT_i}{dt} \quad (4.7)$$

A questo punto dobbiamo implementare un modello che rappresenti accuratamente questa formula utilizzando i blocchi di Simulink. In seguito, viene illustrato una rappresentazione del modello numerico:

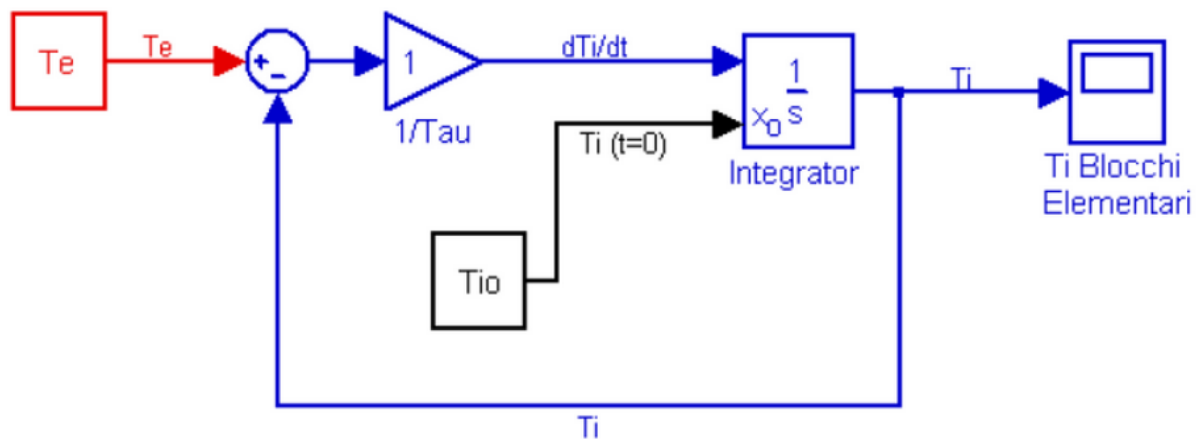


Figura 4.18 Modello Simulink del modello teorico

Le condizioni iniziali definite si riferiscono alla temperatura media rilevata nel laboratorio prima dell'attivazione della termocoppia. Poiché le analisi sono state condotte in un intervallo temporale caratterizzato da variabili condizioni atmosferiche, non si utilizza un parametro fisso, bensì questo viene aggiornato al termine di ogni prova. Nel blocco "Gain" verrà integrato il valore del peso della resistenza della termocoppia, stimato considerando una densità pari a 2,5 g/cm³ e un volume di 2,247 cm³, ottenendo così un valore del peso pari a 5,618 g.

Con questi parametri, questo modello Simulink ci permette di ricavarci il periodo e la corrispondente frequenza di commutazione pari a 50Hz che corrispondono a 20 ms di periodo. Una volta determinato il valore della frequenza di commutazione, è necessario sviluppare un codice che si attivi per un intervallo di tempo corrispondente alla percentuale del duty cycle impostato.

Di seguito, si presenta l'implementazione di tale codice:

```
const int relayPin = 10;
volatile float dutyCycle = 15;
const unsigned long period = 20;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(relayPin, OUTPUT);
  Serial.println("Duty cycle impostato al 10%");
}
void loop() {
  unsigned long onTime = (dutyCycle / 100.0) * period;
  unsigned long offTime = period - onTime;

  digitalWrite(relayPin, HIGH);
  delay(onTime);

  digitalWrite(relayPin, LOW);
  delay(offTime);
}
```

Nella fase iniziale di dichiarazione delle variabili e delle costanti, vengono definiti il pin a cui è collegato il relè (pin 10), il parametro relativo alla percentuale del duty cycle attivo (5%-10%) e il periodo di commutazione (20ms), determinato in base alla frequenza di switching prestabilita (50Hz). Nella seconda fase c'è la funzione void setup () che viene eseguita una sola volta all'avvio del microcontrollore e serve per inizializzare le impostazioni di base del programma. In questa fase abbiamo l'inizializzazione della comunicazione seriale, configurazione del pin del relè come uscita ed infine messaggio di debug sulla porta seriale. Infine, l'ultima sezione del codice rappresenta il nucleo operativo del programma. In questa fase, viene innanzitutto calcolato il tempo durante il quale il relè deve rimanere attivo, determinato in base alla percentuale del duty cycle impostato. Successivamente, sottraendo questo valore dal periodo totale di commutazione, si ottiene il tempo in cui il relè deve rimanere disattivato. In conclusione, il sistema, in funzione della percentuale di duty cycle comandata, mantiene acceso il relè. Si può dunque affermare che l'incremento della temperatura avviene con l'aumentare della percentuale del duty cycle; e viceversa.

4.4.2 Arduino

Arduino è un componente essenziale perché permette l'interfaccia tra un comando numerico ad un comando fisico. Infatti, è un dispositivo che sa gestire segnali sia digitale che analogici e comunicare con più di un dispositivo contemporaneamente. In questo caso, l'Arduino riceve dal computer un segnale di input che, in base al codice implementato, definisce la percentuale di duty cycle da applicare. Il microcontrollore elabora tale comando e lo trasmette in output al relè digitale, che provvede a modulare l'alimentazione della resistenza di riscaldamento.

4.4.3 Relè e calibrazione duty cycle

Un relè è un componente che permette di aprire o chiudere un circuito elettrico mediante un segnale di controllo a bassa potenza, isolando elettricamente il circuito di comando (Arduino) da quello di potenza (Alimentatore). Durante i nostri test abbiamo utilizzato sia un relè meccanico e sia un relè elettronico. Il relè meccanico ha dimostrato di avere un campo di indagine maggiore ma con scarsa ripetitività:

	10%	13%	15%	18%	20%
Test 1	54 °C	64 °C	79 °C	118 °C	121 °C
Test 2	64 °C	70°C	85°C	120 °C	130 °C
Test 3	47 °C	55 °C	70°C	96 °C	105 °C

Le prove sperimentali evidenziano una tendenza lineare; tuttavia, i risultati ottenuti con parametri identici presentano discrepanze significative. Dall'analisi della tabella emerge che, in test differenti, si possono osservare variazioni fino a quasi 30 °C. Tale condizione compromette l'affidabilità dei test. Per questo motivo è stata adottata una soluzione basata su un relè elettronico. Pur limitando il campo di applicazione, tale meccanismo ha permesso di ottenere risultati significativamente più accurati e ripetibili.

	4%	5%	10%	30%
Test 1	24.9 °C	84.5 °C	101.9 °C	181.3°C
Test 2	25.0 °C	84.4 °C	102.0 °C	181.5°C
Test 3	25.0 °C	84.6 °C	102.1 °C	180.7°C

Dall'analisi dei test emerge che l'intervallo di interesse si concentra essenzialmente su due temperature: 84,5 °C e 102 °C. Ai fini della validazione del banco di prova, tali due condizioni termiche risultano sia necessarie che sufficienti.

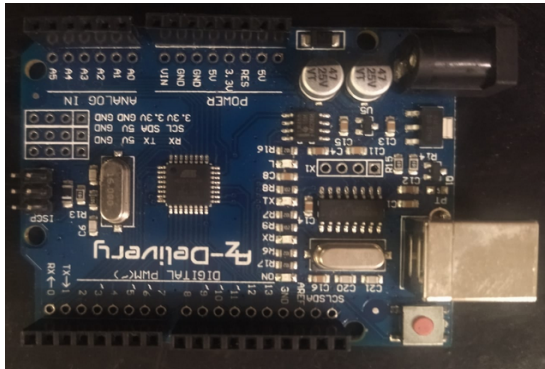


Fig.4.19 Microcontrollore Arduino

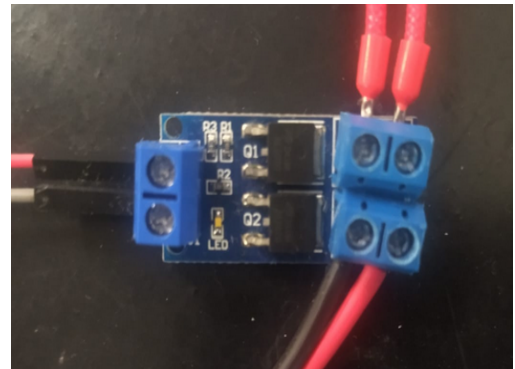


Fig.4.20 Rele digitale

4.4.4 Modulo di alimentazione elettrica

Per l'alimentazione della resistenza di riscaldamento è stato impiegato un alimentatore a corrente continua da 12 V e 1 A. La scelta di tali valori è motivata dall'esigenza di disporre di una potenza elettrica sufficiente (circa 12 W) a garantire il riscaldamento controllato della piastra, senza tuttavia eccedere rispetto ai limiti operativi del sistema né compromettere la sicurezza dell'apparato sperimentale. Una tensione di 12 V rappresenta inoltre uno standard ampiamente diffuso, che consente di semplificare l'integrazione con moduli elettronici di controllo (Arduino e relè) e riduce il rischio di sovratensioni dannose per i componenti. L'intensità di corrente massima di 1 A si è dimostrata adeguata a fornire un flusso termico stabile, permettendo al tempo stesso di mantenere sotto controllo i consumi energetici e la dissipazione complessiva.

4.4.5 Cartuccia termica

Il riscaldatore a cartuccia è un dispositivo elettrico costituito da una resistenza avvolta all'interno di un cilindro metallico compatto, progettato per generare calore in modo localizzato quando attraversato da corrente. Il funzionamento si basa sull'effetto Joule, per cui l'energia elettrica fornita dall'alimentazione viene

trasformata in calore, successivamente trasferito per conduzione alla piastra di alluminio. Questa soluzione risulta particolarmente valida per il banco di prova in quanto consente di riscaldare puntualmente la piastra, riproducendo condizioni termiche controllate e permettendo ai sensori FBG di misurare con precisione i gradienti di temperatura. La geometria ridotta e l'elevata affidabilità del componente semplificano inoltre l'integrazione meccanica e garantiscono la ripetibilità dei test.

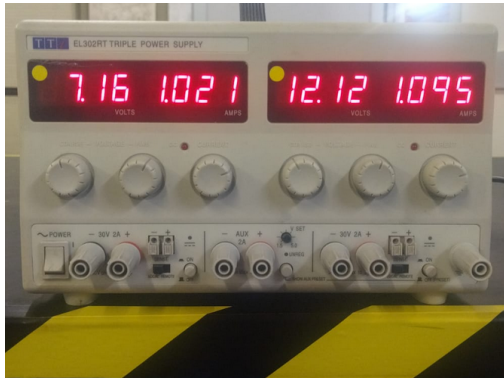


Fig.4.21 Alimentatore

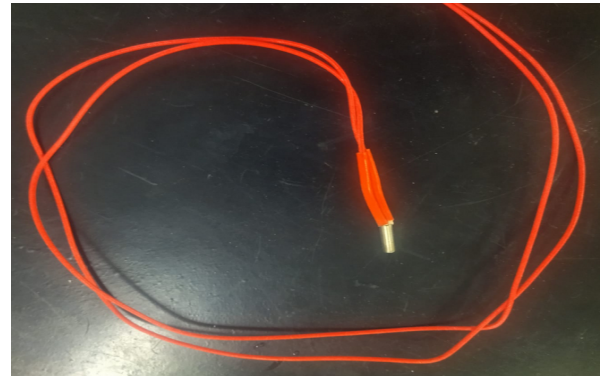


Fig.4.22 Cartuccia termica

V. Test sperimentali

5.1 Procedura di acquisizione

La procedura di acquisizione dei dati di temperatura si articola attraverso una catena di misura basata su sensori a reticolo di Bragg in fibra ottica. I connettori posti alle estremità delle fibre vengono collegati all'interrogatore ottico, il quale registra in tempo reale i valori di lunghezza d'onda riflessa da ciascun sensore. L'interrogatore è a sua volta interfacciato con il computer mediante connessione Ethernet, attraverso cui i dati acquisiti vengono trasferiti e archiviati in una tabella tramite il software dedicato SmartSoft. Successivamente, la tabella viene importata in MATLAB attraverso lo script *prova.m*, che consente la gestione preliminare dei dati. La conversione dei valori di lunghezza d'onda in temperatura, espressa in Kelvin, è effettuata tramite lo script *AcquisizionemodificheT.m*, in cui è implementata la relazione di calibrazione tra variazione spettrale e corrispondente variazione termica. Infine, per una rappresentazione immediata e comparativa dei risultati, i dati elaborati vengono rappresentati graficamente, tracciando gli andamenti temporali delle grandezze misurate dai quattro sensori FBG.



Figura 5.1 Interrogatore ottico SmartScan

5.2 Tempistiche della sperimentazione

In seguito, vengono illustrate quantità di ogni parametro per la determinazione delle tempistiche della sperimentazione:

PARAMETRO	QUANTITA'
N° piastre	2
N° punti indagine	8
Replica prova	5
Durata test [min]	60

Le piastre oggetto di sperimentazione sono due: una configurata in condizioni on nominal, rappresentativa del caso di funzionamento standard, e una in condizioni off nominal (danneggiata con una compressione in prossimità della estremità destra dell'heat pipe), utilizzata per verificare il comportamento in scenari non ottimali. Su ciascuna piastra sono stati individuati otto punti di indagine termica, corrispondenti ai fori predisposti nell'involucro isolante. Per ogni punto di misura, il test è stato replicato cinque volte, al fine di garantire un adeguato livello di ripetibilità statistica e conseguentemente una maggiore affidabilità dei risultati.

Ogni singolo test è stato strutturato secondo una sequenza temporale definita: una fase iniziale di stabilizzazione termica di circa 5 minuti, seguita da 40 minuti di prova attiva e infine da 10 minuti di raffreddamento controllato. Tali valori devono essere considerati come tempi medi di riferimento, in quanto la piastra in configurazione on nominal, caratterizzata da una maggiore capacità dissipativa, raggiunge la condizione di equilibrio con tempi più lunghi e a temperature inferiori rispetto alla piastra in configurazione off nominal.

La stima del tempo necessario a completare tutta la campagna di test è stata calcolata come il prodotto di diversi parametri. Questi parametri definiscono il numero totale delle prove e la durata di ciascuna di esse. Nello specifico il risultato è stato ottenuto come il prodotto tra il numero di piastre, il numero di punti di indagine, il numero di ripetizioni eseguite sullo stesso punto di indagine ed infine il tempo necessario per ogni test.

$$T = N_{\text{piastra}} \times N_{\text{indagine}} \times N_{\text{ripetizione}} \times t_{\text{test}} = 2 \times 8 \times 5 \times 60 \text{ [min]} = 4800 \text{ min} = 80 \text{ h}$$

Da una stima approssimativa risulta che il tempo complessivo richiesto per l'esecuzione della campagna di test sperimentale è pari a circa 80 ore.

5.3 Grafici test sperimentali

In questo sottocapitolo vengono presentati e discussi i grafici relativi ai test sperimentali condotti. La trattazione segue una sequenza logica volta a rendere chiara la progressione delle analisi. Si parte dall'esame della configurazione della piastra in condizioni on nominal, illustrando i profili termici rilevati dai quattro sensori. In un primo caso viene analizzato l'andamento con la sorgente di calore applicata direttamente sull'heat pipe, mentre successivamente si considera la condizione con la sorgente termica posta su un'estremità della piastra radiativa. I due scenari vengono quindi confrontati evidenziando similitudini e differenze nei comportamenti osservati.

La trattazione prosegue con l'analisi della configurazione off nominal, per la quale viene applicata la stessa metodologia descritta in precedenza: studio degli andamenti termici, confronto tra i due scenari di applicazione della sorgente di calore e discussione delle principali differenze riscontrate. L'analisi si conclude con un raffronto diretto con i risultati ottenuti in condizioni on nominal, al fine di mettere in evidenza le divergenze più significative e individuare gli elementi distintivi che consentono di discriminare le due configurazioni in fase operativa.

Infine, viene proposta un'ulteriore analisi volta a valutare l'aspetto della ripetibilità sperimentale. A tale scopo vengono riportati quattro grafici rappresentativi che consentono di evidenziare il comportamento medio e le eventuali deviazioni tra prove replicate nelle stesse condizioni operative. La campagna di test sperimentali ha prodotto circa 80 test.

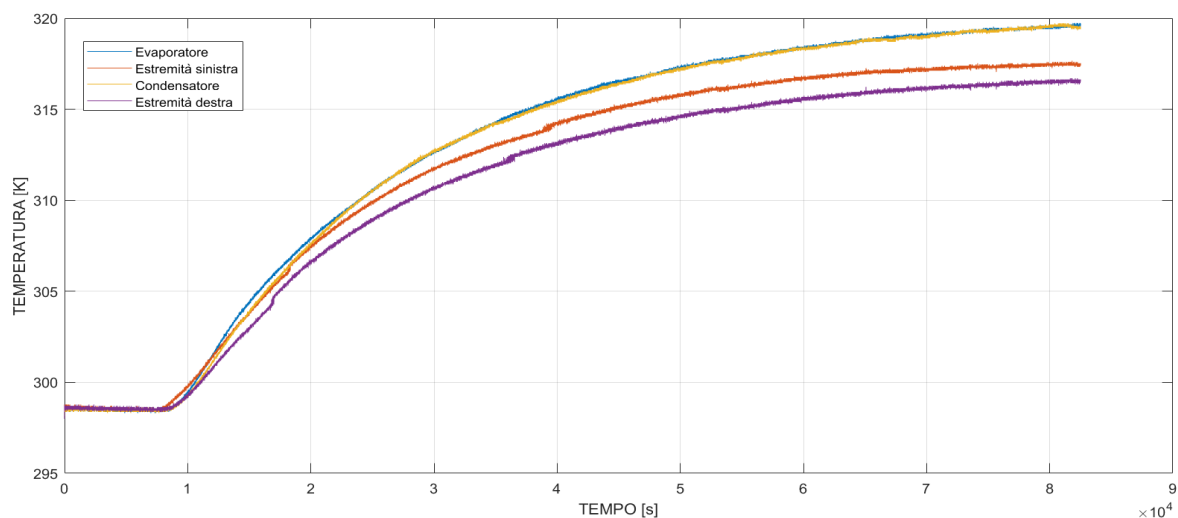


Fig.5.2 Grafico test sperimentale

5.3.1 Configurazione on nominal (Heat Pipe)

I grafici riportano l'andamento delle temperature misurate dai quattro sensori in corrispondenza della configurazione on nominal con la sorgente di calore applicata in posizione 1, coincidente con la zona dell'evaporatore.

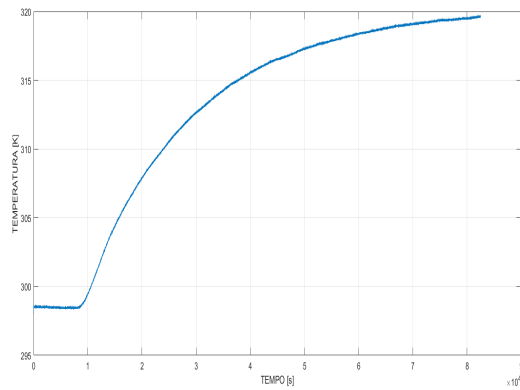


Fig.5.3 Evaporatore ($T_{cw}=319.6682$ K)

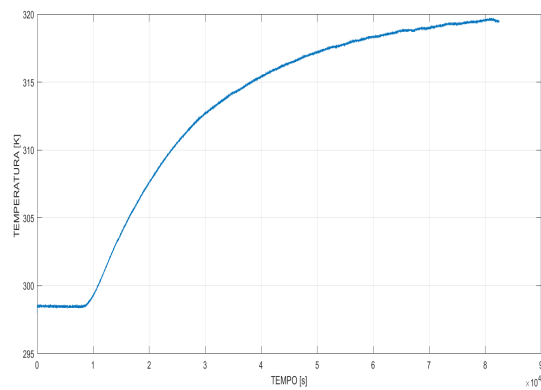


Fig.5.4 Condensatore ($T_{cw}=319.5246$ K)

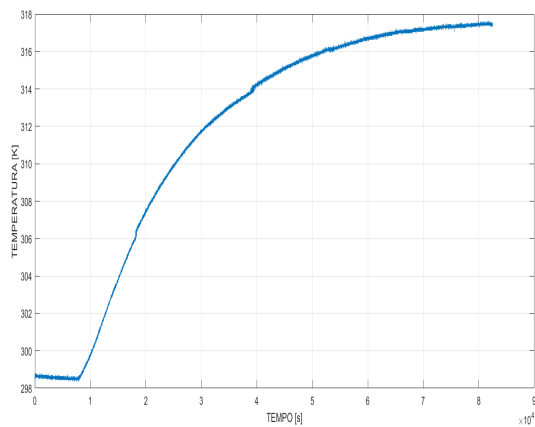


Fig.5.5 Estremità sx ($T_{p1}= 317.527$ K)

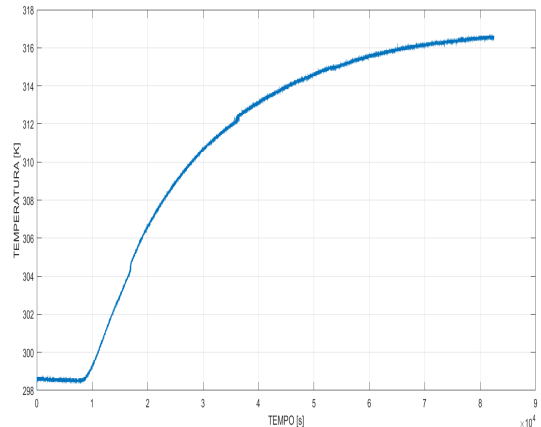


Fig.5.6 Estremità dx ($T_{p2}=316.5721$ K)

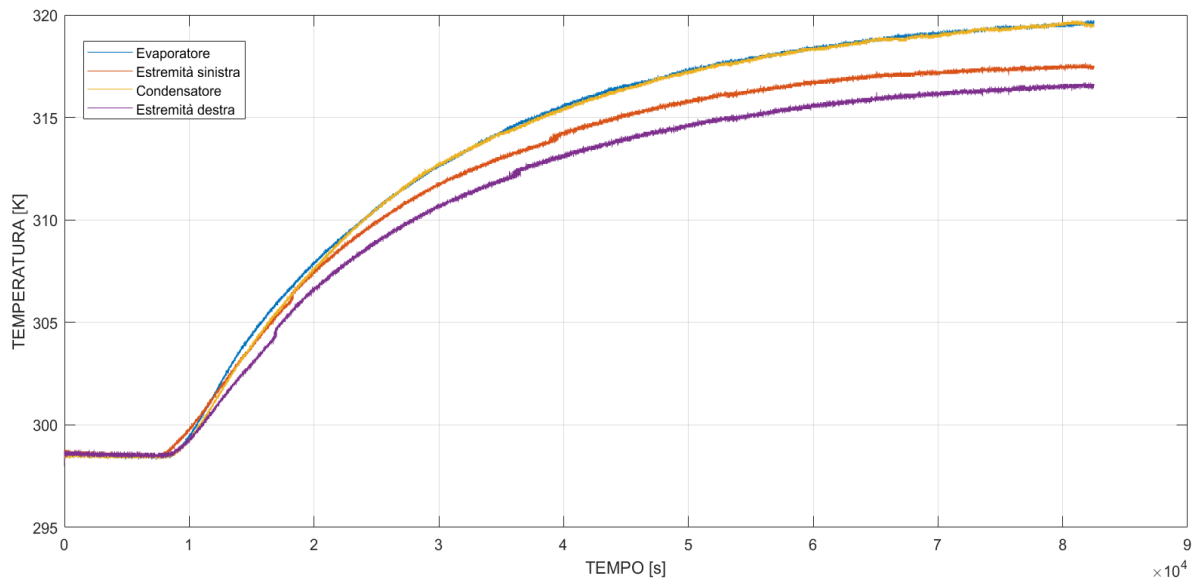


Fig.5.7 Confronto temperature on nominal nel Heat pipe

In questo unico grafico sono riportate le curve caratteristiche acquisite dai quattro sensori, al fine di consentire una visione comparativa complessiva. La prima osservazione riguarda il fatto che la temperatura massima è registrata in corrispondenza dell'evaporatore ($T_{ew}=319.67\text{ K}$), seguita da quella rilevata presso il condensatore ($T_{cw}=319.53\text{ K}$). La minima differenza tra i due valori rappresenta un'evidenza del corretto funzionamento dell'heat pipe, in quanto conferma l'efficiente trasferimento di calore lungo il condotto. Tale comportamento risulta inoltre coerente con le condizioni operative nominali e con il livello relativamente basso della temperatura di esercizio, che favorisce un'elevata capacità di trasporto termico.

Come previsto le temperature più basse sono le temperature lette dai sensori disposti sulle due estremità della piastra ($T_{p1}=317.527\text{ K}$ e $T_{p2}=316.5721\text{ K}$), ovvero situati alla maggiore distanza dalla sorgente termica. Tuttavia, c'è da notare che queste due temperature hanno una leggera discrepanza nonostante sia equidistanti dalla fonte di calore. Questo comportamento è attribuibile alla non omogeneità dell'involucro di isolante termico che provoca questa leggera asimmetria nella distribuzione termica.

5.3.2 Configurazione on nominal (Estremità sinistra)

I grafici riportano l'andamento delle temperature misurate dai quattro sensori in corrispondenza della configurazione on nominal con la sorgente di calore applicata in posizione 3, coincidente con la estremità sinistra della piastra radiativa.

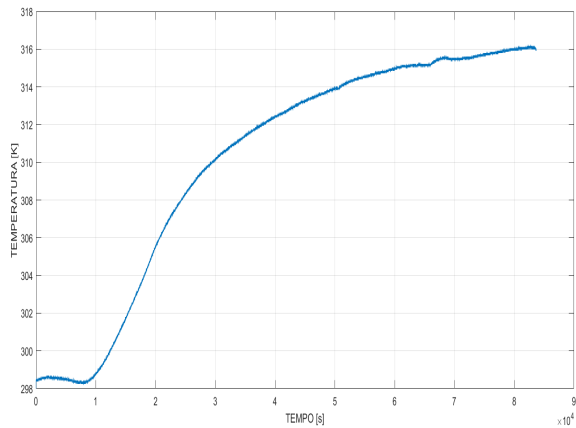


Fig.5.8 Evaporatore ($T_{ew}=315.9180$ K)

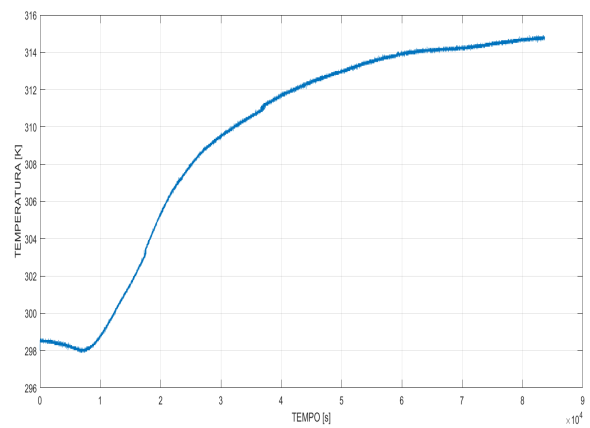


Fig.5.9 Condensatore ($T_{cw}=314.7162$ K)

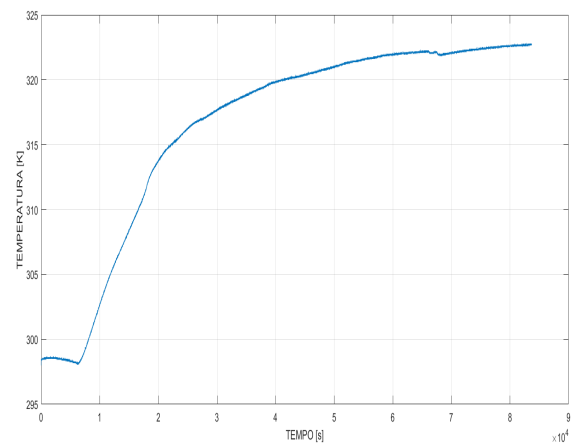


Fig.5.10 Estremità sx ($T_{p1}=322.7185$ K)

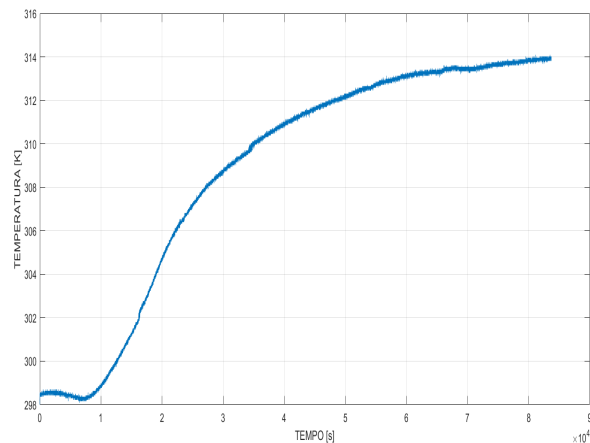


Fig.5.11 Estremità dx ($T_{p2}=313.8874$ K)

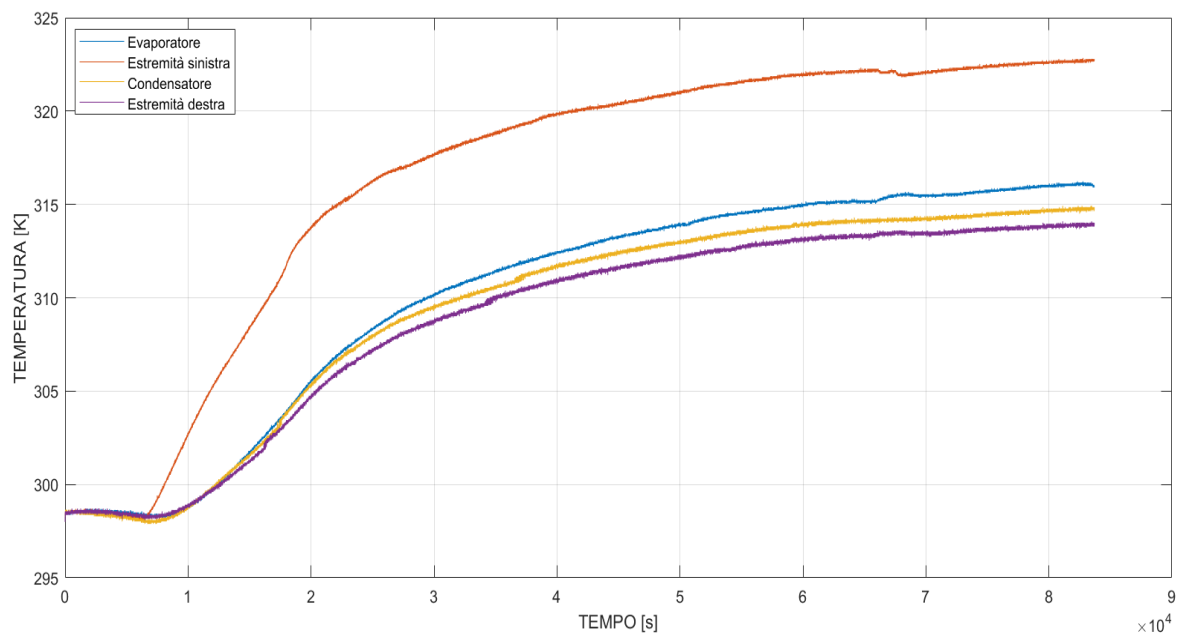


Fig.5.12 Confronto temperature con sorgente termica nella estremità sx

Dal grafico si osserva chiaramente che il sensore collocato sull'estremità sinistra della piastra registra le temperature più elevate, con uno scarto significativo rispetto ai valori misurati dagli altri sensori. Seguono i due sensori posizionati lungo l'heat pipe, i quali mostrano andamenti termici pressoché sovrapponibili, a conferma della corretta conduzione interna del dispositivo. Infine, il valore di temperatura più basso è rilevato dal sensore posto sull'estremità destra della piastra, come atteso in relazione alla distanza dalla sorgente termica.

5.3.3 Configurazione off nominal (Heat Pipe)

I grafici riportano l'andamento delle temperature misurate dai quattro sensori in corrispondenza della configurazione off nominal con la sorgente di calore applicata in posizione 1, coincidente con la zona dell'evaporatore.

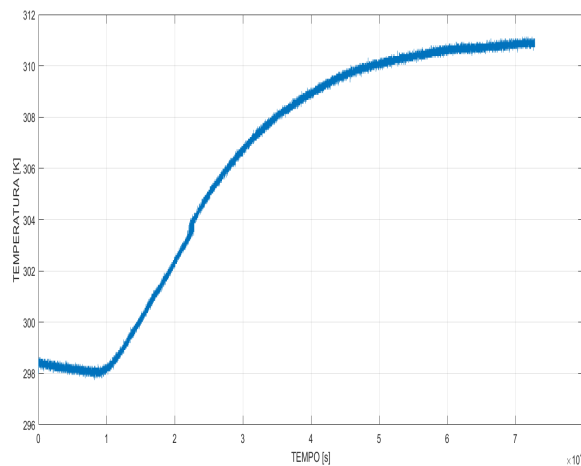


Fig.5.13 Evaporatore ($T_{ew}=310.9324$ K)

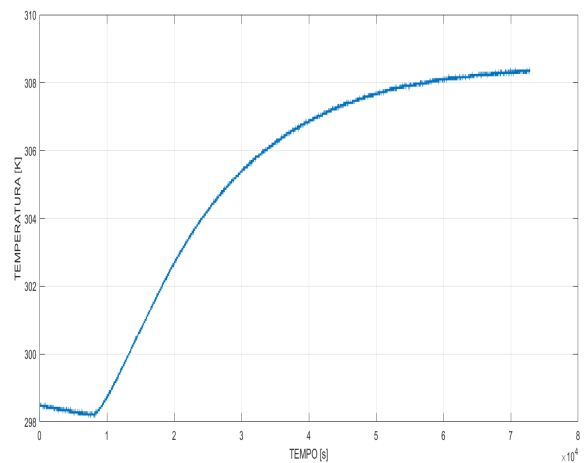


Fig.5.14 Condensatore ($T_{cw}=308.3852$ K)

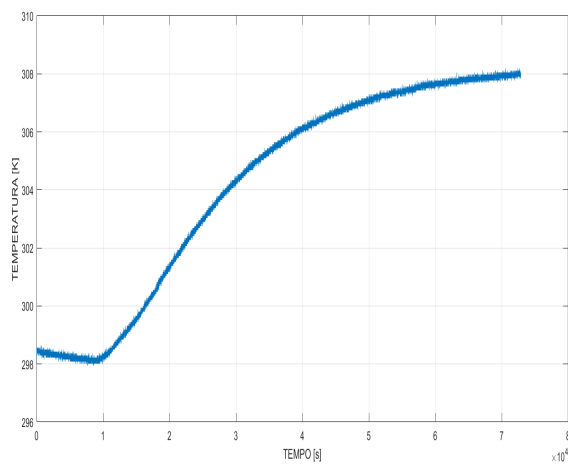


Fig.5.15 Estremità sx ($T_{p1}=307.9775$ K)

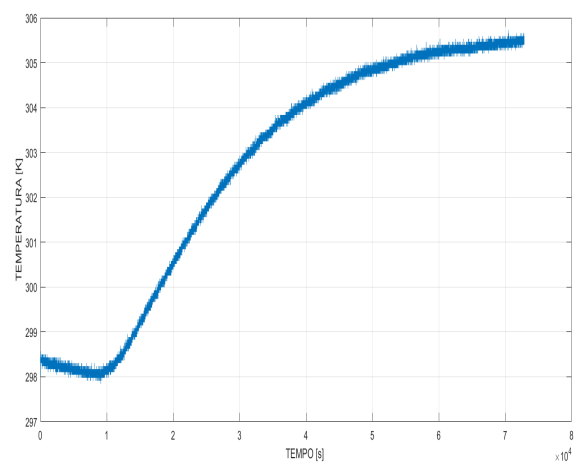


Fig.5.16 Estremità dx ($T_{p2}= 305.4664$ K)

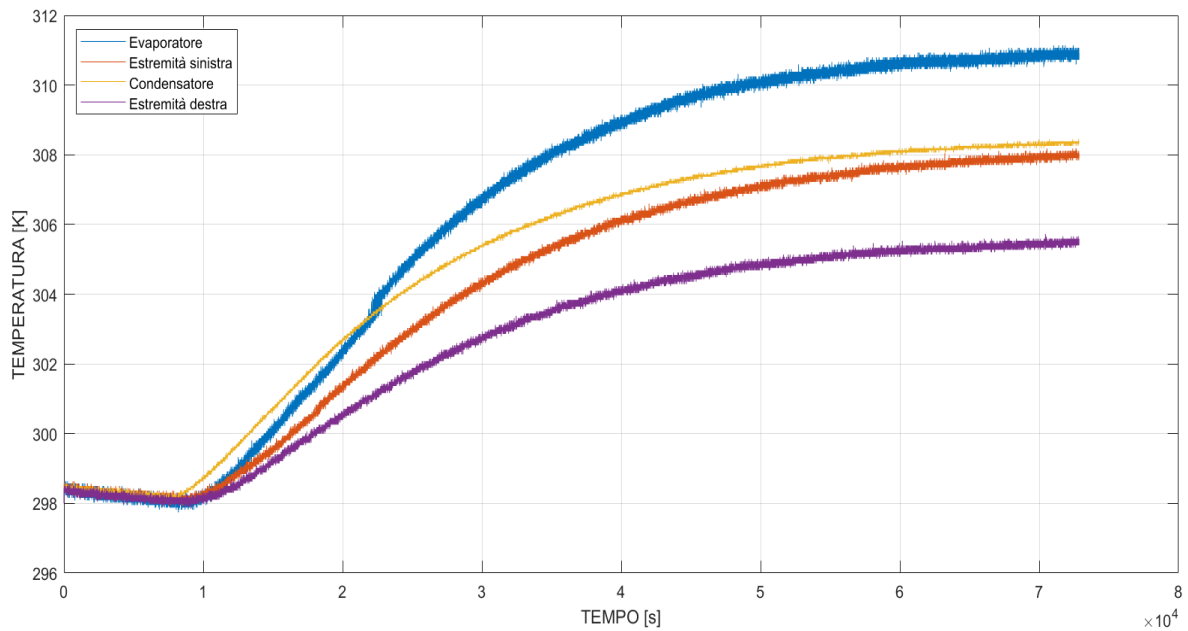


Fig.5.17 Confronto temperature off nominal nel Heat pipe

Dal grafico si evidenzia come le temperature più elevate siano raggiunte in corrispondenza dell'evaporatore, ossia nella zona in cui è collocata la cartuccia termica. Nella configurazione off nominal, a differenza di quanto osservato in condizioni on nominal, la temperatura del condensatore non risulta prossima a quella dell'evaporatore. Tale comportamento può essere attribuito a un malfunzionamento dell'heat pipe, che non assicura un corretto trasferimento di calore lungo il condotto, compromettendo l'equilibrio termico tra le due estremità attive.

Le temperature rilevate ai bordi laterali della piastra radiativa mostrano a loro volta una differenza apprezzabile. Questo scostamento è verosimilmente riconducibile a una non perfetta uniformità dell'involucro isolante che circonda la piastra, il quale determina dispersioni termiche localizzate e un conseguente andamento non simmetrico della distribuzione di temperatura.

5.3.4 Configurazione off nominal (Estremità destra)

I grafici riportano l'andamento delle temperature misurate dai quattro sensori in corrispondenza della configurazione off nominal con la sorgente di calore applicata in posizione 7, coincidente con la estremità destra della piastra radiativa.

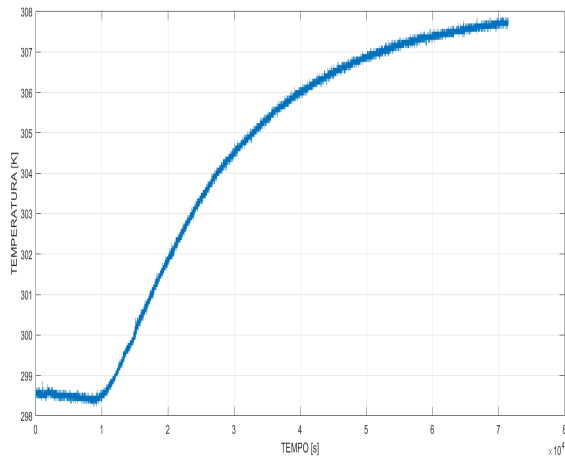


Fig.5.18 Evaporatore ($T_{cw}=307.7072$ K)

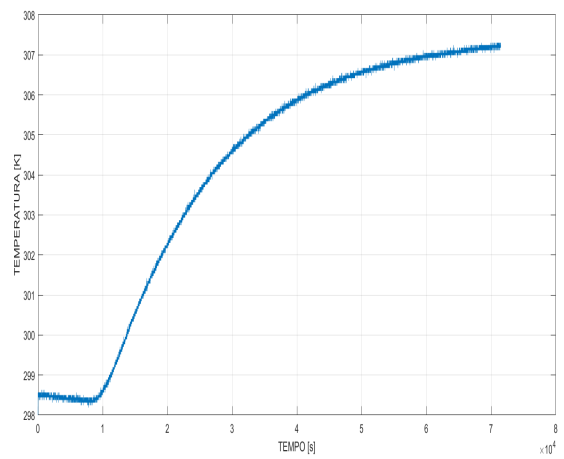


Fig.5.19 Condensatore ($T_{cw}= 307.245$ K)

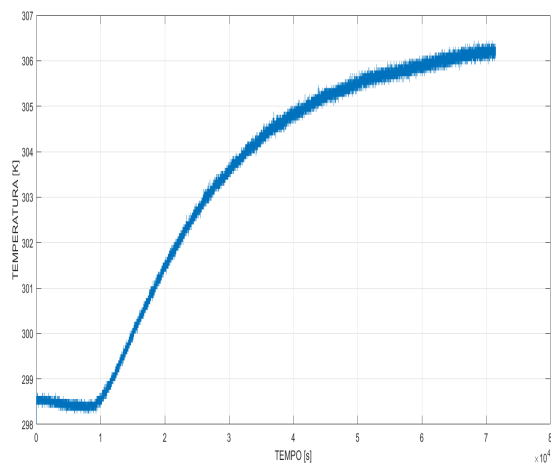


Fig.5.20 Estremità sx ($T_{p1}=306.2479$ K)

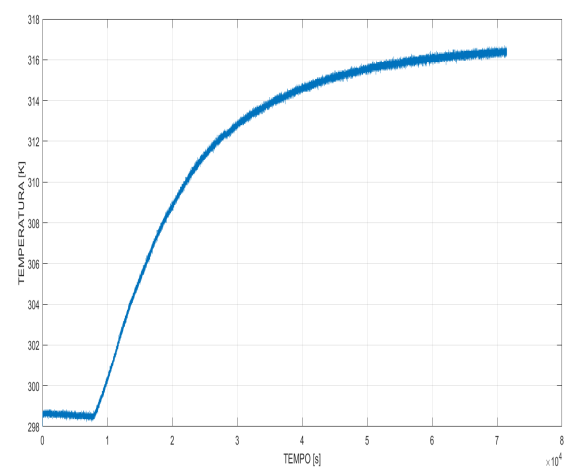


Fig.5.21 Estremità dx ($T_{p2}= 316.2297$ K)

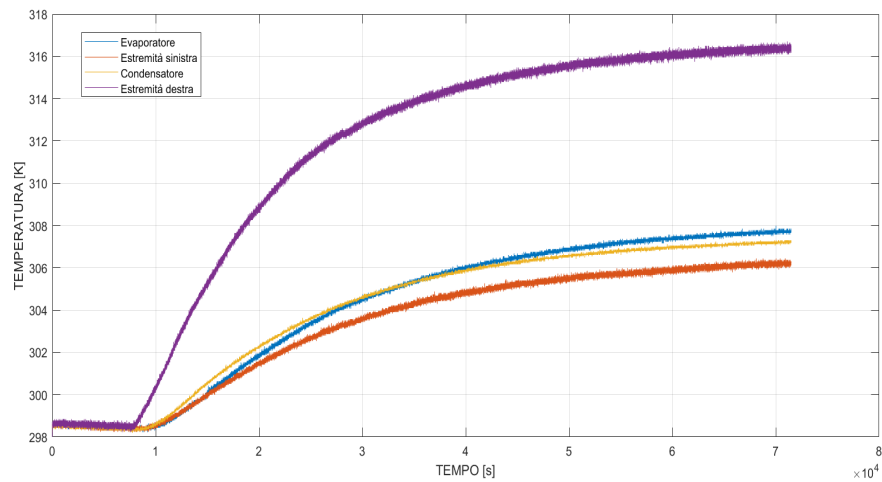


Fig.5.22 Confronto temperature con sorgente termica nel estremità dx

Dal grafico si osserva chiaramente che il sensore collocato sull'estremità destra della piastra registra le temperature più elevate, con uno scarto significativo rispetto ai valori misurati dagli altri sensori. Seguono i due sensori posizionati lungo l'heat pipe, i quali mostrano andamenti termici pressoché sovrapponibili. Infine, il valore di temperatura più basso è rilevato dal sensore posto sull'estremità sinistra della piastra, come atteso in relazione alla distanza dalla sorgente termica

5.4 Confronto cicli

In seguito, sono illustrati i quattro cicli della configurazione off nominal con la cartuccia termica nell'estremità destra:

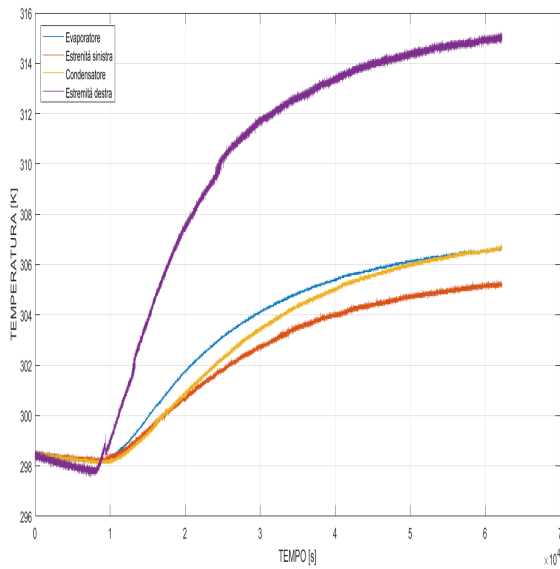


Fig.5.23 Ciclo 1 Estremità dx off nominal

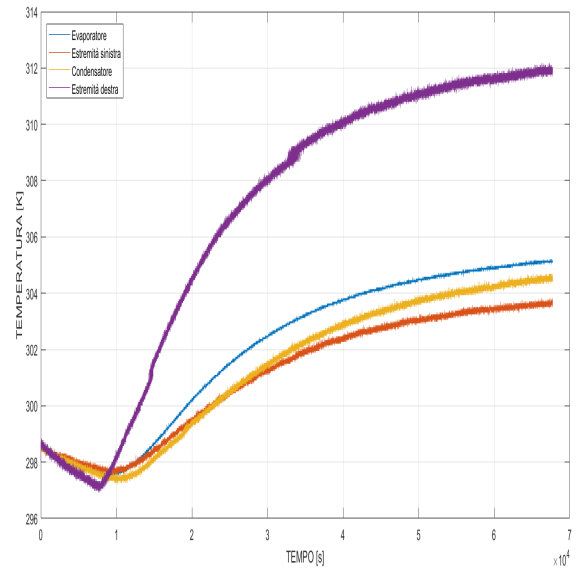


Fig.5.23 Ciclo 2 Estremità dx off nominal

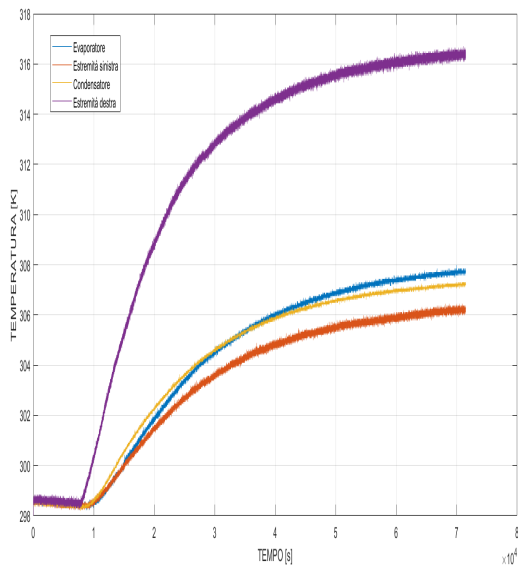


Fig.5.24 Ciclo 3 Estremità dx off nominal

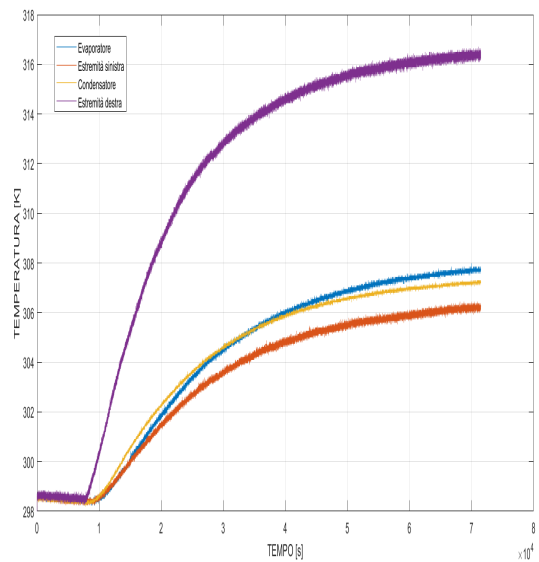


Fig.5.25 Ciclo 4 Estremità dx off nominal

L'analisi dei diversi cicli sperimentali è volta a evidenziare la coerenza dei risultati ottenuti e a verificarne la ripetibilità, al fine di confermare l'affidabilità del processo di misura e delle condizioni di prova.

In questa sezione sono stati scelti come grafici rappresentativi i grafici del ciclo maggiormente discrepante nell'intera campagna sperimentale. Infatti, questi grafici appartengono alla configurazione off nominal con la sorgente di calore disposta sull'estremità della piastra radiativa.

Da questo confronto emerge che le temperature lette dai sensori FBG hanno complessivamente un andamento simile ma raggiungono delle temperature massime che presentano uno scostamento dell'ordine di 2–3 °C. Questa variazione può essere attribuita a diversi fattori come la temperatura ambiente, umidità o il contatto tra cartuccia termica e piastra. Disturbi esterni difficili da controllare.

Nonostante queste variazioni, le relazioni relative tra i valori registrati dai diversi sensori risultano costanti, a conferma della coerenza generale del comportamento termico della piastra.

5.5 Confronto tra on nominal e off nominal

In questo capitolo vengono messi a confronto gli andamenti termici rilevati nelle configurazioni on nominal e off nominal, con l'obiettivo di evidenziare le principali differenze nel comportamento del heat pipe e di analizzare l'influenza delle diverse condizioni operative sulla distribuzione di temperatura.

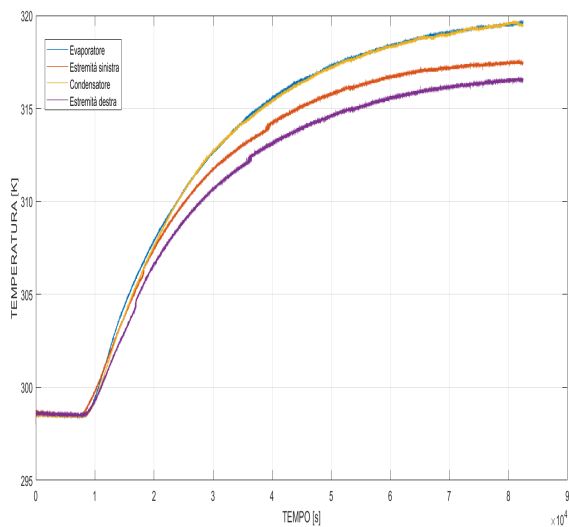


Fig.5.26 Heat pipe on nominal

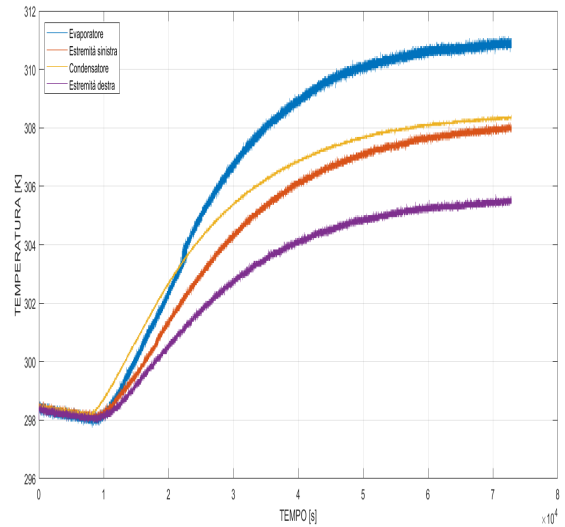


Fig.5.27 Heat pipe off nominal

Le due figure mostrano gli andamenti termici rilevati dai quattro sensori durante le prove sperimentali eseguite nelle configurazioni on nominal (a sinistra) e off nominal (a destra).

Nella configurazione on nominal, l'heat pipe non è danneggiata e opera con le prestazioni di progetto. Questo significa che abbiamo delle temperature che raggiungono la fase stazionaria con tempi molto più lunghi rispetto un sistema con configurazione off nominal. Questa caratteristica è determinata dal fatto che l'heat pipe riesce a dissipare meglio la potenza termica generata dalla resistenza e quindi il sistema necessita di tempi più lunghi per poter raggiungere una condizione di equilibrio termico. Per quantificare la differenza di dinamica termica, è possibile valutare la pendenza massima delle curve nel tratto di riscaldamento iniziale, corrispondente alla massima velocità di variazione della temperatura nel tempo. Indicando con $T(t)$ la temperatura misurata e con dT/dt il suo gradiente temporale, si ottiene per il punto di massima inclinazione:

$$m=dT/dt \quad (5.1)$$

Dall'analisi dei dati si ottiene questa tabella con valori approssimativi:

	ΔT	Δt	m
On nominal	18 °C	2.0×10^4 s	9.0×10^{-4} °C/s
Off nominal	14 °C	1.5×10^4 s	9.3×10^{-4} °C/s

Configurazione on nominal → pendenza più bassa, dovuta all'assorbimento energetico nei processi di evaporazione-condensazione e alla maggiore inerzia termica.

Configurazione off nominal → pendenza più alta, dovuta al trasferimento di calore puramente conduttivo e alla minore capacità termica equivalente del sistema.

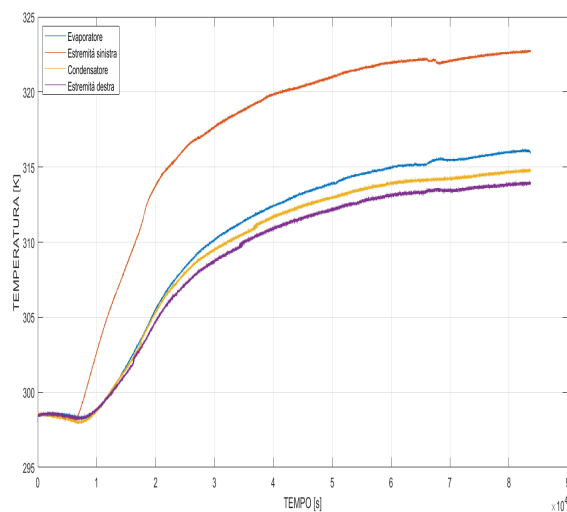


Fig.5.28 Estremità sx on nominal

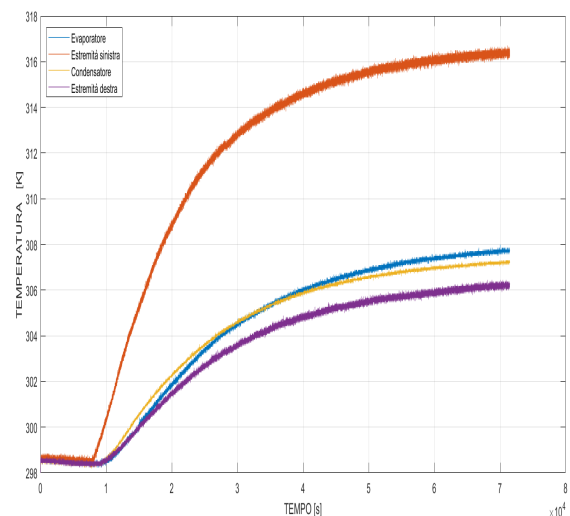


Fig.5.29 Estremità sx off nominal

Le due figure riportano gli andamenti termici rilevati dai quattro sensori durante i test condotti con la sorgente di calore applicata sull'estremità della piastra radiativa, in configurazione on nominal (a sinistra) e off nominal (a destra).

Entrambi i grafici presentano un comportamento complessivamente simile: l'aumento di temperatura è più pronunciato nel sensore collocato in prossimità della sorgente termica (estremità sinistra), mentre i sensori disposti in posizione

più lontana (in particolare l'estremità destra) mostrano un incremento più graduale e valori di regime inferiori. Tale andamento è coerente con la propagazione del calore lungo la piastra conduttrice.

Nella configurazione on nominal, l'heat pipe garantisce una distribuzione termica più uniforme che comporta una differenza lieve tra il sensore disposto sull'evaporatore e il sensore disposto sul condensatore. Nella configurazione off nominal invece il contributo di trasmissione di calore avviene pressoché solo tramite le pareti metalliche esterne. Questo comporta un più marcato gradiente termico tra le temperature registrate sulle due estremità dell'heat pipe.

In entrambi i casi, tuttavia, l'andamento temporale delle curve risulta simile, proprio perché la posizione della sorgente di calore esterna — non coincidente con l'heat pipe — rende marginale il contributo del fluido bifase al trasferimento di calore

Dall'analisi dei dati si ottiene questa tabella con valori approssimativi:

	ΔT	Δt	m
On nominal	25 °C	2.5×10^4 s	1.0×10^{-3} °C/s
Off nominal	20 °C	1.8×10^4 s	1.1×10^{-3} °C/s

Le due pendenze risultano confrontabili in ordine di grandezza, ma leggermente superiori nel caso off nominal, dove il trasferimento termico è governato da conduzione diretta e il sistema presenta una minore inerzia termica. Nel caso on nominal, la presenza parziale del fluido bifase introduce una capacità termica effettiva maggiore e una più graduale variazione di temperatura nel tempo, con un ritardo nella stabilizzazione.

VI. Modello MATLAB

La figura seguente mostra una vista complessiva del modello Simulink sviluppato per la verifica e la validazione dei risultati sperimentali.

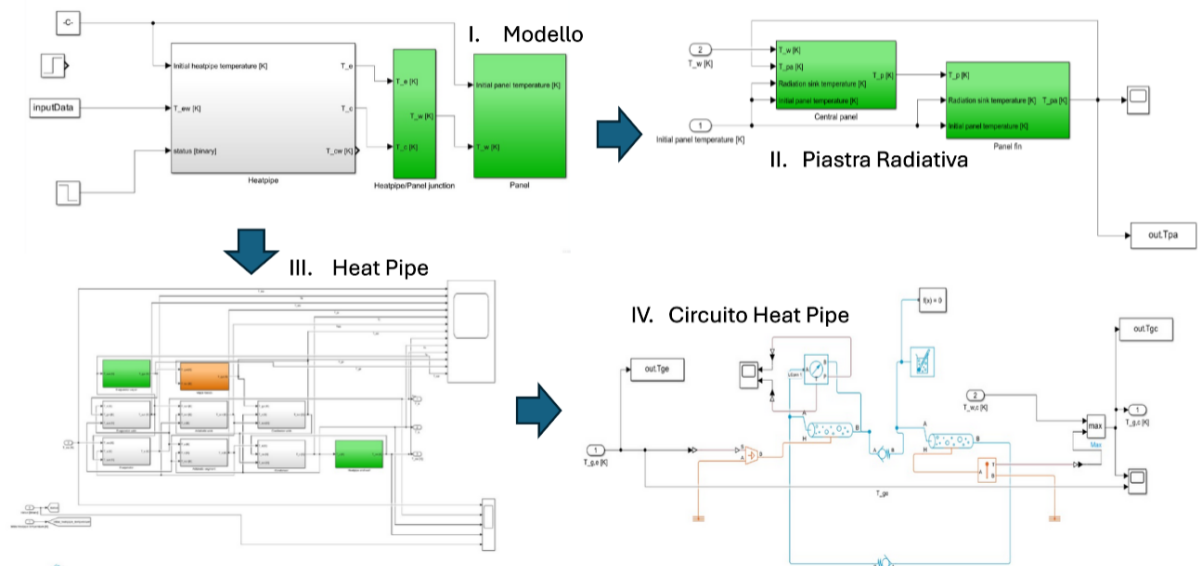


Fig.7.1 Rappresentazione esplosa del modello Matlab

In alto a sinistra è rappresentato il modello principale, costituito da tre macro-sezioni funzionali: heat pipe, giunzione heat pipe/pannello e pannello radiativo.

Le frecce indicano il flusso logico dell'analisi e permettono di approfondire progressivamente la struttura interna di ciascun sottosistema. Procedendo a cascata, si può esplorare il dettaglio dei blocchi costitutivi che descrivono i diversi fenomeni fisici coinvolti: il comportamento termico dell'heat pipe, la conduzione nella giunzione e la distribuzione della temperatura lungo il pannello.

In questa rappresentazione “esplosa” sono evidenziati i principali elementi del modello che verranno analizzati singolarmente nelle sezioni successive, al fine di comprendere nel dettaglio il loro contributo al comportamento termico complessivo e alla correlazione con i risultati ottenuti durante la campagna sperimentale.

6.1 Modello Generale

In questa immagine viene illustrato l'esplosione del modello sviluppato su Simulink per rappresentare in base numerica il sistema fisico delle prove sperimentali. Nel modello viene messo in evidenza le tre sezioni principali e le rispettive interazioni termiche.

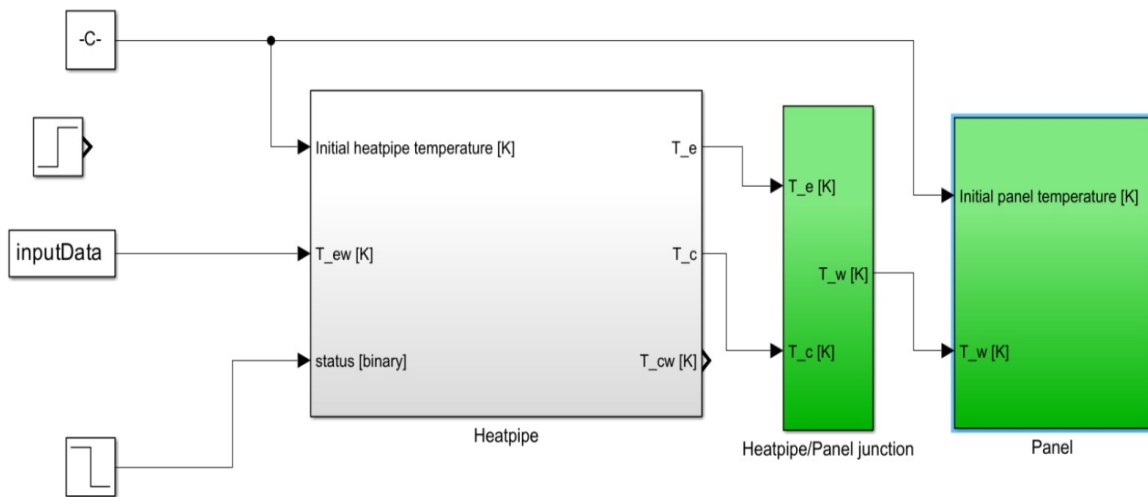


Fig.1 Vista esplosa del modello simulink

Il blocco *Heatpipe* modella la dinamica termica del tubo di calore, ricevendo in ingresso la temperatura iniziale, la temperatura della parete dell'evaporatore (T_{ew} [K]) derivata dai dati sperimentali e un segnale binario di stato. In uscita fornisce le temperature caratteristiche dell'evaporatore (T_e [K]) e del condensatore (T_c [K]), utilizzate nel blocco successivo.

Il sottosistema *Heatpipe/Panel Junction* è il blocco in cui avviene l'integrazione numerica per passare dal mondo 1D dell'heatpipe a quello 2D del pannello.

Infine, il blocco *Panel* simula la risposta termica del pannello, calcolando la temperatura superficiale (T_{pw} [K]) in funzione delle condizioni imposte dalla giunzione. Tale grandezza costituisce il parametro di confronto con le misure sperimentali acquisite tramite sensori FBG

6.1.1 Heat Pipe

La figura mostra la struttura interna del sottosistema Heat Pipe, che costituisce il nucleo fisico del modello termico complessivo. Tale sezione è stata progettata per rappresentare in modo dettagliato i fenomeni di scambio termico e trasporto di calore che avvengono all'interno del tubo di calore, suddividendone la geometria in sottocomponenti funzionali.

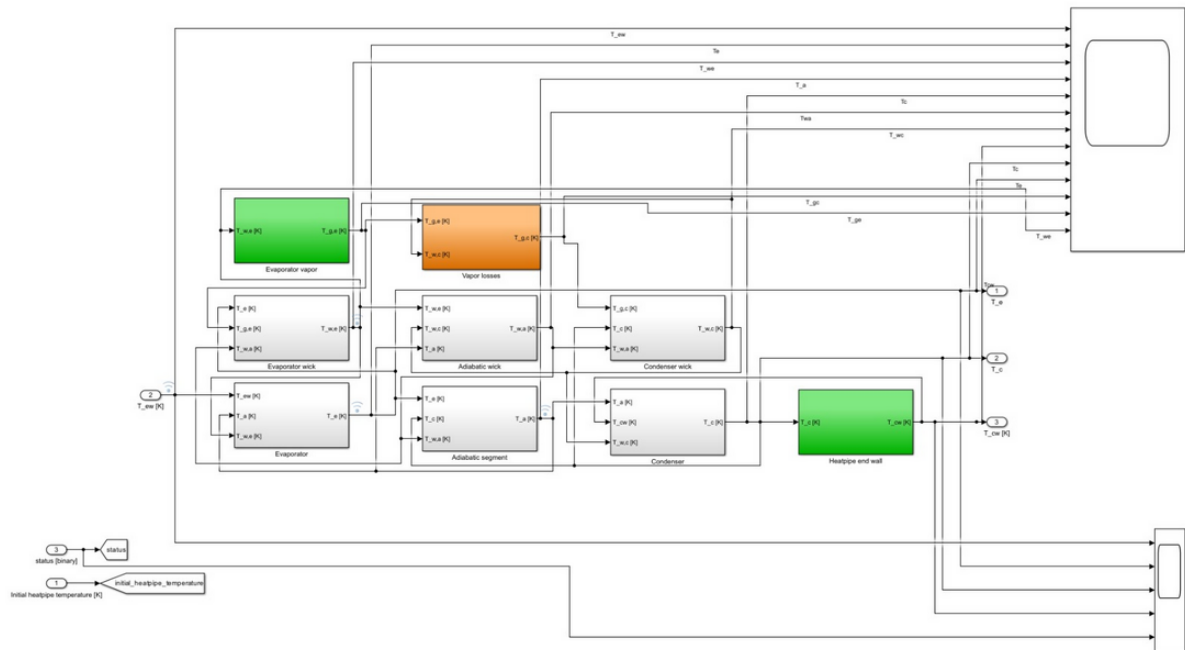


Fig.7.2 Rappresentazione del heat pipe su Simulink

Il modello è organizzato in una catena di blocchi che riproduce la successione reale delle regioni che compongono l'heat pipe:

- **Evaporatore:** questa sezione si occupa di descrivere la zona in cui il fluido di lavoro evapora riscaldato dalla resistenza termica. Qui abbiamo come input la temperatura $T_{ew} [K]$ (temperatura della parete dell'evaporatore) che rappresenta la condizione termica forzante.
- **Evaporator wick :** questa sezione descrive il trasferimento del calore nel rivestimento poroso (wick) e l'avvio del ciclo evaporazione-condensazione permesso dal trasporto bifase per capillarità.
- **Evaporator vapor:** questa sezione si occupa di modellare la fase di vapore generata. Nell'evaporatore si assume che la formazione del vapore avvenga guidata solo dalla conduzione.

- Adiabatic segment : la parte adiabatica rappresenta la sezione centrale del tubo. In questa regione il fluido si presuppone che non abbia significativi scambi termici con l'esterno e scorra in equilibrio termico.
- Adiabatic wick: questa sezione simula il comportamento del wick nella regione centrale adiabatica.
- Condenser wick: questo blocco si occupa di descrivere la fase di condensazione del fluido. In questa sezione avviene il rilascio di calore latente e la conduzione di calore termica verso le pareti del condensatore.
- Condenser: questo blocco simula la conduzione nel corpo metallico della sezione fredda e il trasferimento verso la giunzione con la piastra radiativa.
- Heatpipe end wall : questa sezione permette quell'interfaccia terminale attraverso la quale il calore dal heat pipe è trasmesso ad un eventuale modulo successivo.
- Vapor losses,: questo blocco ha il compito di tenere conto delle perdite di pressione legate al moto del vapore attraverso tutto il condotto; La corretta pressione serve infatti a garantire la giusta direzione del flusso di vapore.

Le temperature input di questa sezione del modello sono:

- T_{ew} [K]: temperatura misurata sulla parete dell'evaporatore;
- T_a [K]: corrisponde alla temperatura ambiente di riferimento;
- Status: questo input ci permette di attivare o disattivare il funzionamento dell'heat pipe in base alla condizione operativa (on/off nominal).

Le temperature output di questa sezione del modello sono:

- T_e : temperatura dell'evaporatore
- T_c : temperatura del condensatore
- T_{cw} : temperatura della parete terminale dell'heat pipe

Questi valori saranno gli input termici per la sezione successiva che corrisponde alla giunzione heat pipe/pannello radiativo.

6.1.2 Circuito Heat Pipe

L'immagine mostra il modello Simulink del circuito termico dell'heat pipe, che rappresenta il trasferimento di calore tra evaporatore e condensatore e la relativa interazione con le pareti del sistema.

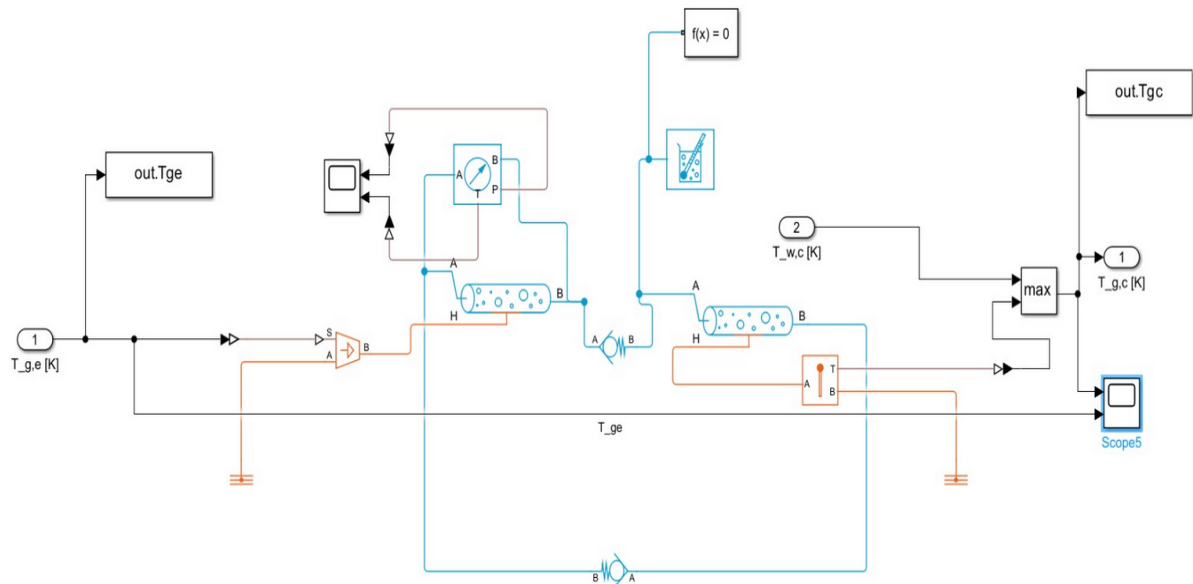


Fig.7.3 Rappresenazione del circuito del heat pipe

Nel dettaglio:

- T_{ge} [K]: corrisponde all'input di temperatura del gas in corrispondenza dell'evaporatore, che si ottiene dal blocco precedente.
- Il blocco out.Tge acquisisce la temperatura T_{ge} e salva in seguito i dati nel workspace .
- I condotti e i volumi azzurri corrispondono alla porzione bifasica del circuito.
- I condotti e i volumi arancioni corrispondono tutti gli elementi di conduzione termica del sistema.
- I blocchi con i simboli valvola sono dei blocchi che hanno il compito di assicurarsi che il flusso termico all'interno del sistema si muova nella direzione corretta.
- T_{wc} [K]: corrisponde alla temperatura del fluido o della parete in prossimità del condensatore. Questa temperatura viene poi confrontata con la temperatura calcolata dal circuito tramite un blocco max per determinare il valore di temperatura di uscita più rappresentativo. La temperatura finale corrisponde alla temperatura del gas del condensatore T_{gs} .

- Scope 5: In questo blocco vengono illustrati gli andamenti delle temperature T_{ge} e T_{gc} in modo da poterli visualizzare e confrontare.

In breve, questa sezione del modello va ad indagare sul comportamento del trasferimento di gas dalla zona calda alla zona fredda all'interno dell'heat pipe proponendo con un modello numerico ciò che accade fisicamente

6.1.3 Miglioramento heat pipe

Inizialmente il modello ci restituiva una temperatura del gas del condensatore T_{gc} costante pari a circa alla temperatura ambiente di riferimento.

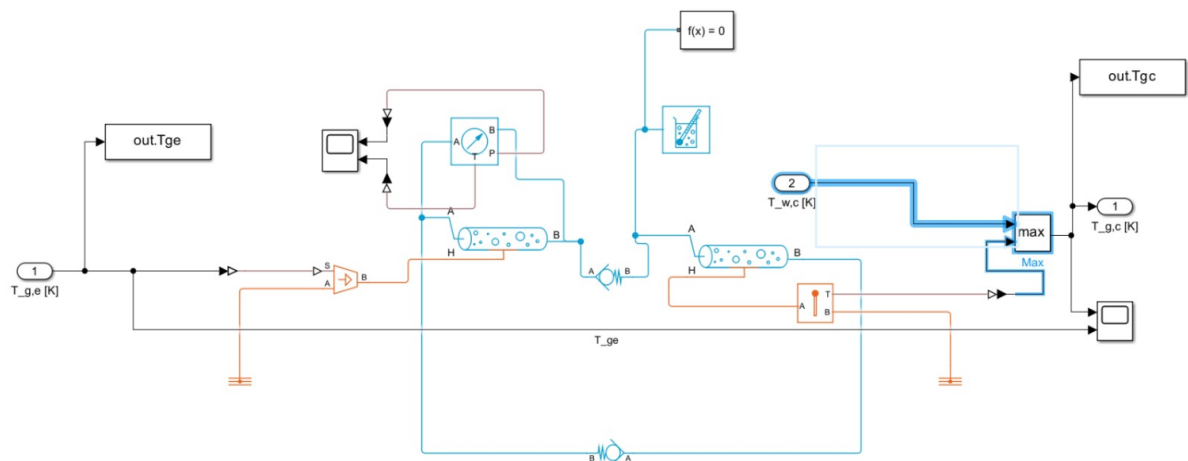


Fig.7.4 Modifica1 nel circuito heat pipe

Questa anomalia nasce da un errore nel modello che prevedeva la possibilità che il flusso di calore si muovesse sia dall'esterno verso l'interno della heat pipe (dal *wick* al *vapor*), sia in direzione opposta (dal *vapor* al *wick*). Il blocco max ha la funzione di selezionare la temperatura massima tra quella del *vapor* e quella del *wick*, eliminando così la possibilità di un flusso di calore dall'esterno. In pratica, imponendo che la temperatura di uscita del circuito sia pari a quella del *wick*, si impedisce lo scambio termico inverso tra le due regioni.

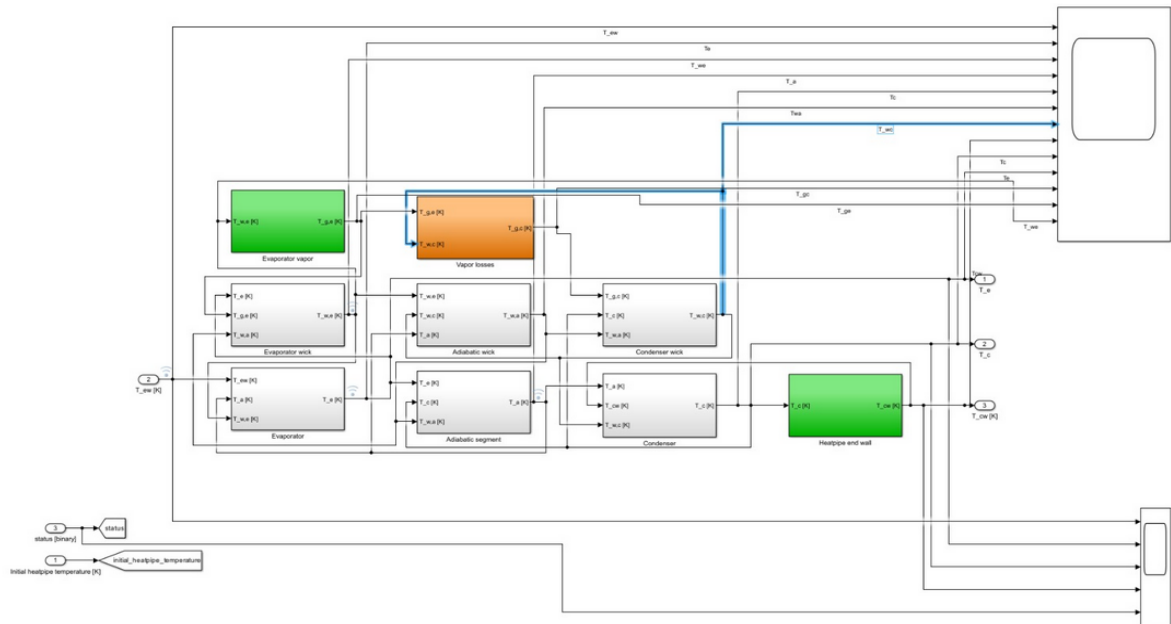


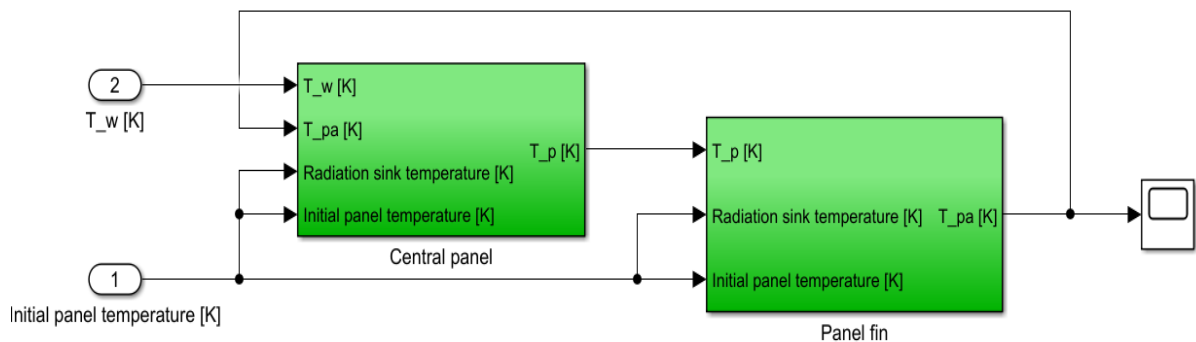
Fig.7.5 Modifica 2 nel circuito heat pipe

Come mostrato nella seconda figura, il blocco del circuito è stato inoltre collegato al sottosistema che fornisce in uscita $T_{w,c}$, permettendo un aggiornamento iterativo del parametro e una rappresentazione più realistica dello scambio termico tra fluido e parete.

Dal punto di vista fisico e modellistico, questa modifica ci permette di rompere l'assunzione bidirezionale di trasferimento energetico. Ora c'è un accoppiamento termico unidirezionale tra il fluido di lavoro e la parete del condensatore. In questo modo il modello ci restituisce un comportamento dinamico dell'heat pipe più fedele.

6.1.4 Pannello radiativo

La figura mostra la struttura del sottosistema Panel, dedicato alla modellazione del comportamento termico della piastra radiativa accoppiata all'heat pipe. Tale sezione riceve in ingresso il flusso termico proveniente dalla giunzione heat pipe/pannello e ne descrive la distribuzione lungo la superficie della piastra.



Il modello è composto da due blocchi principali:

- Central panel, che rappresenta la parte centrale della piastra radiativa, direttamente collegata alla giunzione termica con l'heat pipe. In questa regione la temperatura T_w proveniente dalla giunzione costituisce la principale condizione al contorno. Il blocco elabora i parametri di temperatura iniziale del pannello e la temperatura del sink radiativo T_{pa} simulando così la propagazione del calore per conduzione all'interno del dominio centrale.
- Panel fin corrisponde alla zona periferica della piastra. In questa regione il calore si dissipa con l'ambiente esterno per convezione residua. Questo blocco riceve come input la temperatura misurata dal pannello centrale (T_p) e la temperatura ambiente di riferimento e da come output la temperatura del pannello all'estremità. In questo modo si riesce ad avere dati utili per poter descrivere la distribuzione termica e il gradiente termico lungo la piastra radiativa.

Rispetto al modello originale sono state apportate delle modifiche strutturali per poter considerare che la trasmissione di calore avvenga per convezione. Infatti, il modello fisico di riferimento non è nel vuoto ma in un ambiente terrestre isolato da un involucro di isolante termico.

6.1.5 Adattamento del pannello ai dati sperimentali

Per descrivere correttamente il comportamento termico della piastra in Simulink, sono state apportate modifiche al modello originario. A titolo esemplificativo, si riportano le variazioni introdotte nel *panel fin*, estendibili anche al pannello centrale.

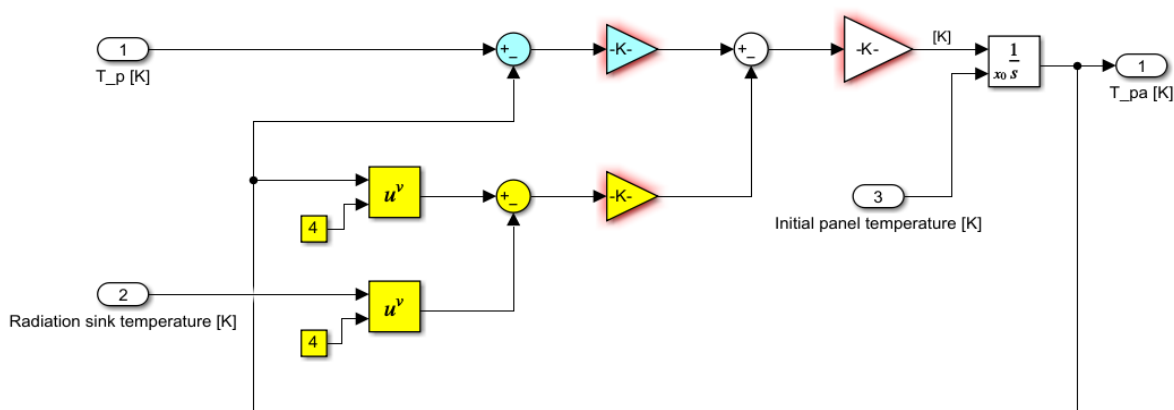


Figura.1 Panel Fin –trasmissione calore puramente radiativa

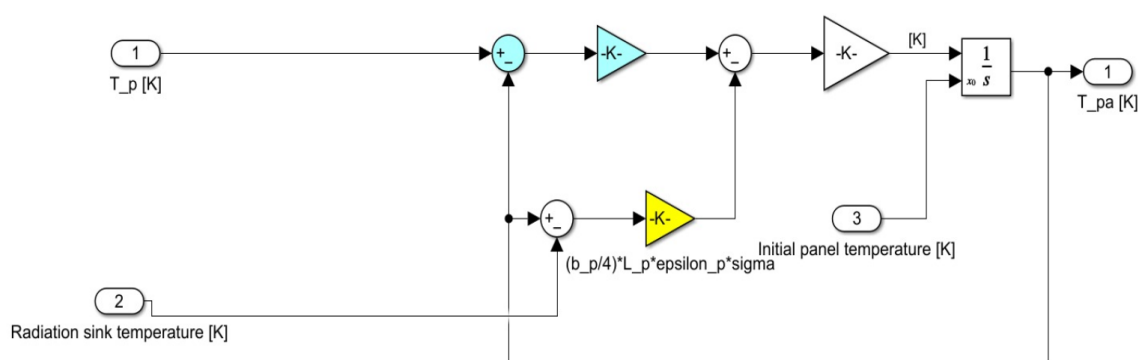


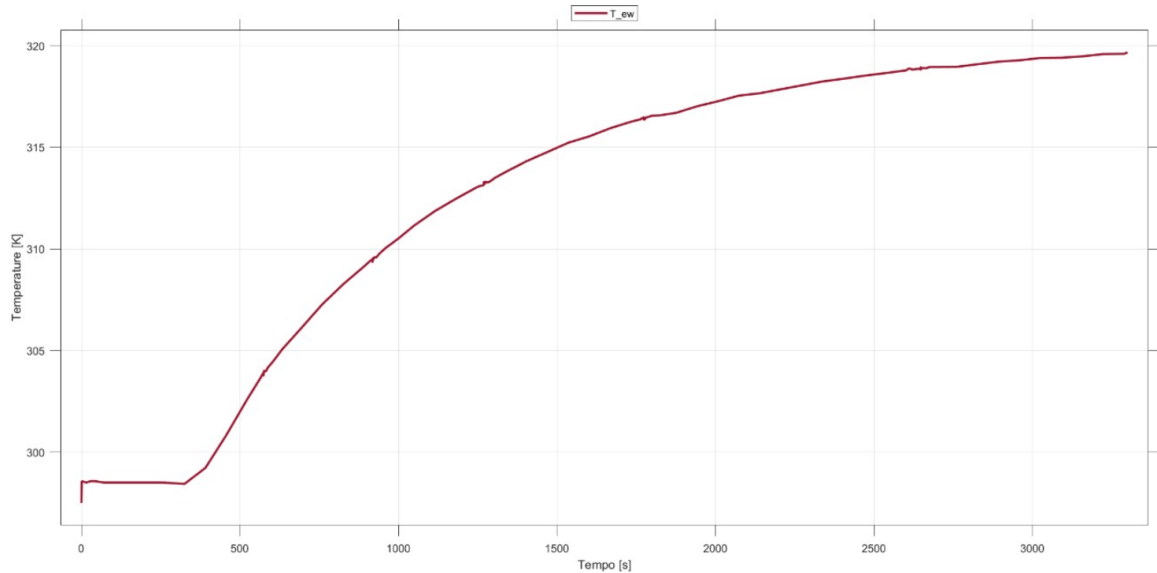
Figura.2 Panel Fin –trasmissione calore conduttiva-radiativa

Le modifiche al modello sono state introdotte in quanto la formulazione originale considera la piastra operante in condizioni di scambio termico puramente radiativo, come nel caso di un ambiente spaziale. Tuttavia, nel contesto sperimentale in esame tali condizioni non risultano applicabili.

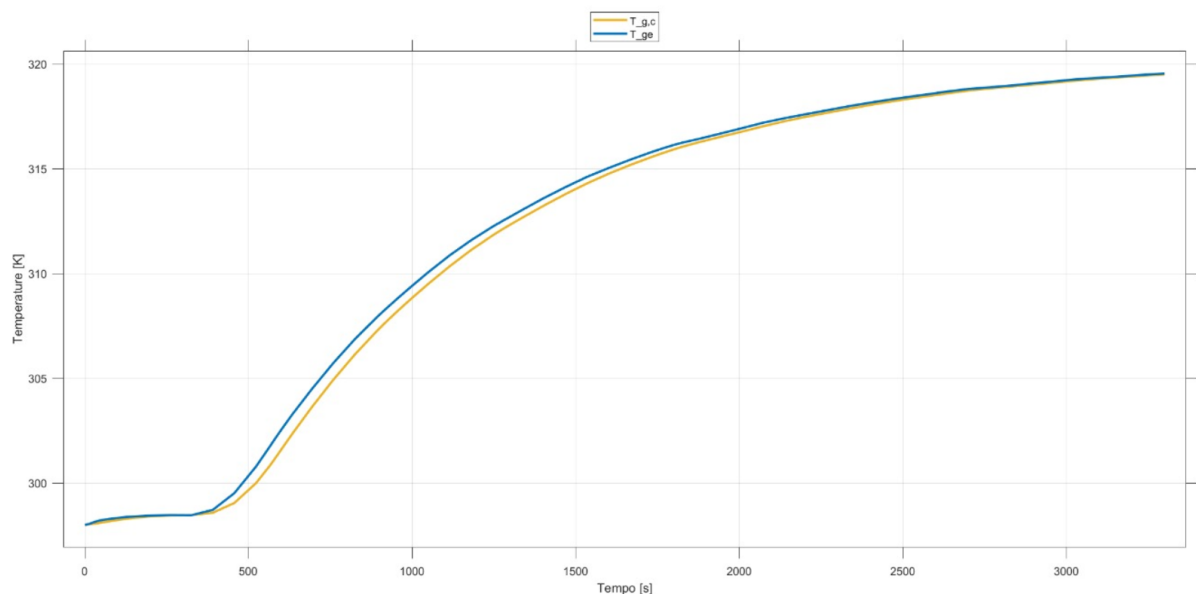
Come detto precedentemente la piastra ha un involucro di isolante termico che al compito di mitigare le dispersioni di calore per via convettiva. Essendo dunque lontni dalle condizioni di vuoto bisogna modificare la struttura del modello affinché la trasmissione di calore avvenga per convezione e conduzione.

6.2 Grafici Simulink

In seguito, vengono riportati i principali grafici calcolati tramite il modello Simulink che prende in input la temperatura maggiore (che corrisponde alla posizione su cui è disposta la cartuccia termica).

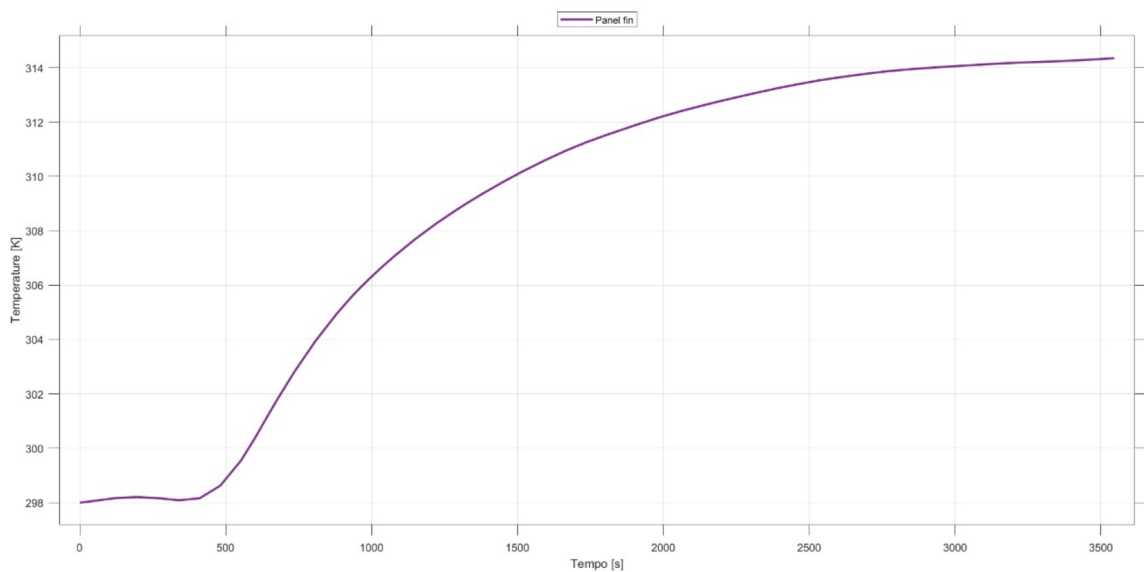


La figura mostra l'andamento della temperatura forzante, corrispondente alla misura acquisita dal sensore posizionato al di sotto della cartuccia termica. Tale grandezza rappresenta l'unico dato termico sperimentale fornito al modello Simulink mediante il comando *InputData*, con lo scopo di generare la simulazione delle restanti temperature del sistema e consentire il confronto diretto con i risultati ottenuti durante le prove sperimentali.



La figura riporta l'andamento delle temperature simulate del gas nell'evaporatore (T_{ge}) e nel condensatore (T_{gc}). Si osserva come entrambe presentino valori inferiori rispetto alla temperatura forzante, a causa delle perdite termiche verso l'ambiente e dei fenomeni di trasmissione del calore tra le superfici esterne e interne dell'heat pipe.

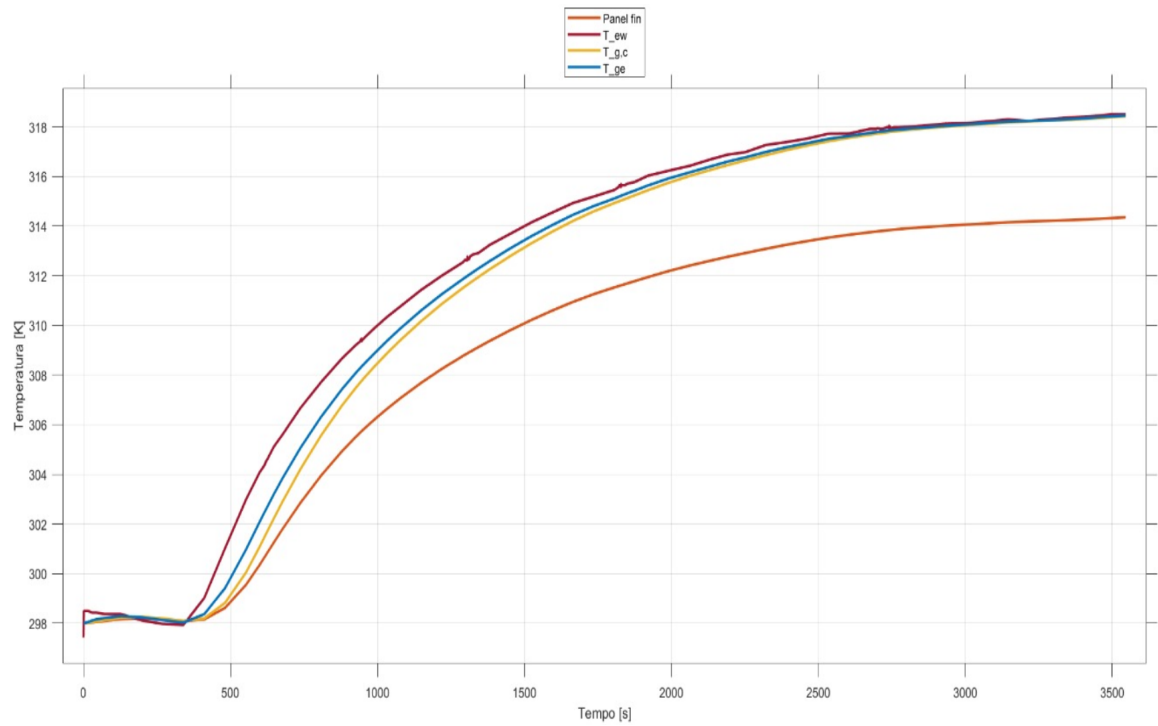
È inoltre evidente che la temperatura del condensatore risulta leggermente inferiore rispetto a quella dell'evaporatore. Ciò è coerente con la configurazione del sistema, in cui il condensatore è collocato all'estremità opposta rispetto alla cartuccia termica. Di conseguenza, pur raggiungendo valori termici comparabili, la dissipazione energetica lungo il percorso di trasferimento e il principio di funzionamento stesso dell'heat pipe determinano un gradiente di temperatura residuo, con il condensatore che mantiene valori lievemente più bassi.



La figura mostra l'andamento della temperatura misurata dal sensore collocato sull'estremità della piastra radiativa. È possibile osservare come tale temperatura risulti significativamente inferiore rispetto alla temperatura forzante, evidenziando l'effetto del gradiente termico lungo la piastra.

Questa differenza è coerente con la configurazione geometrica del sistema, che prevede la presenza di un heat pipe centrale integrato in una piastra di larghezza pari a 15 cm. Di conseguenza, il sensore in esame si trova a una distanza minima di circa 7,5 cm dalla sorgente termica, condizione che comporta una naturale

attenuazione della temperatura per effetto della conduzione e della dissipazione termica lungo il materiale.



In quest'ultimo grafico sono riportate la temperatura forzante e le temperature simulate ottenute dal modello Simulink. Tale rappresentazione consente un confronto diretto tra i diversi andamenti termici, evidenziando in modo chiaro e immediato le differenze e le correlazioni descritte nelle analisi precedenti.

VII Confronto Test Sperimentali/Simulink

7.1 Configurazione on nominal (Heat Pipe posizione 1)

In seguito sono illustrati i grafici sperimentali/simulink nella posizione 1:

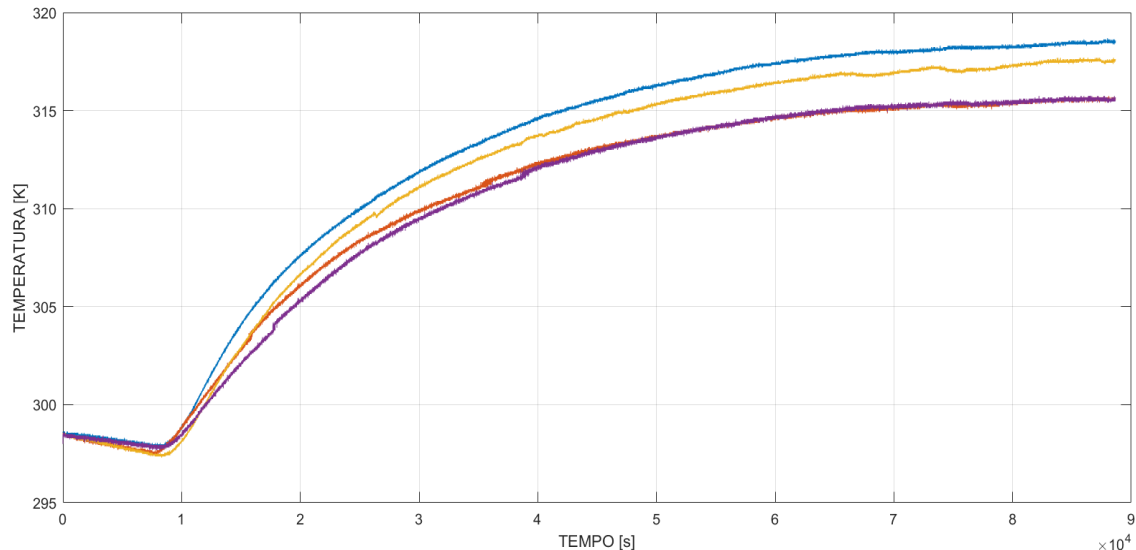


Figura 7.1 Test sperimentale on nominal heat pipe (posizione 1)

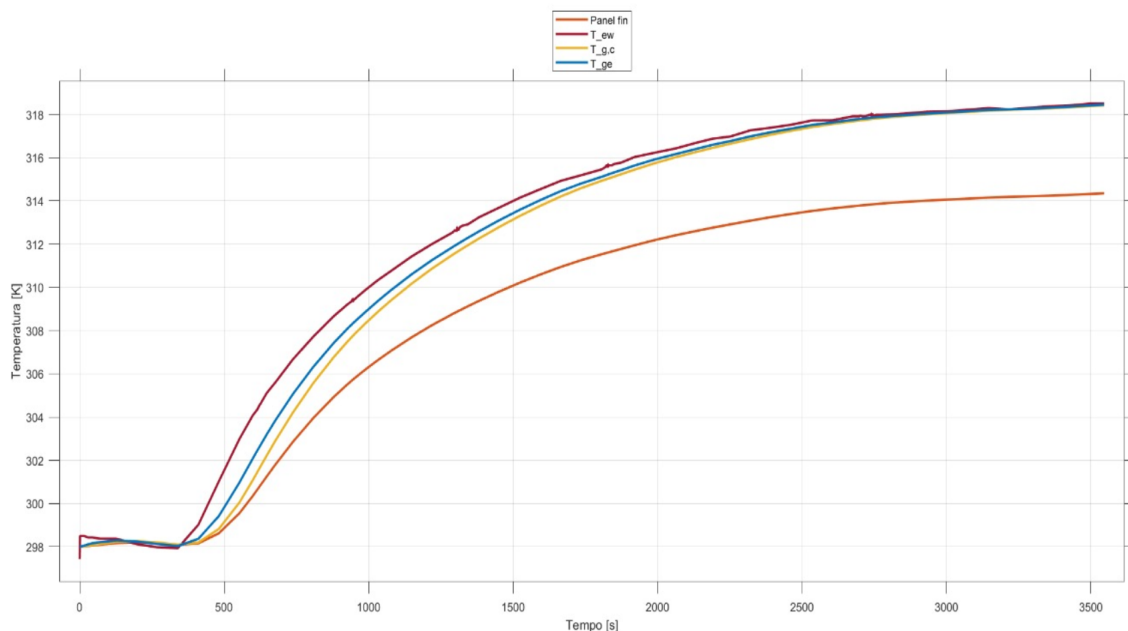


Figura 7.2 Test Simulink on nominal heat pipe (posizione 1)

In questo paragrafo viene effettuato un confronto tra i risultati ottenuti per la configurazione on *nominal*, caratterizzata dalla presenza della cartuccia termica posizionata sull'heat pipe (posizione 1-illustrato nel paragrafo dell'involucro

isolante). Dall'analisi congiunta di queste due rappresentazioni grafiche si osserva che gli andamenti delle temperature del gas evaporatore-condensatore (linea blu-gialla) risultano pressoché sovrapponibili, raggiungendo in entrambi i casi un valore massimo di circa 320 °C nello stesso intervallo temporale. Analogamente, la temperatura della piastra radiativa (linea arancione) mostra un comportamento coerente nei due casi, mantenendosi inferiore rispetto a quella del gas e stabilizzandosi intorno a 315 °C.

Si evidenziano tuttavia alcune differenze tra i grafici: nel test sperimentale sono riportate le curve relative a entrambe le estremità della piastra, che mostrano lievi scostamenti dovuti alla non perfetta uniformità dell'isolante termico. Nel modello Simulink, invece, la condizione di simmetria ideale determina la sovrapposizione completa delle due curve.

Infine, nel grafico di simulazione è presente anche la curva della temperatura forzante, rappresentata in rosso scuro, utilizzata come input per la modellazione termica del sistema.

7.2 Configurazione on nominal (Heat Pipe posizione 5)

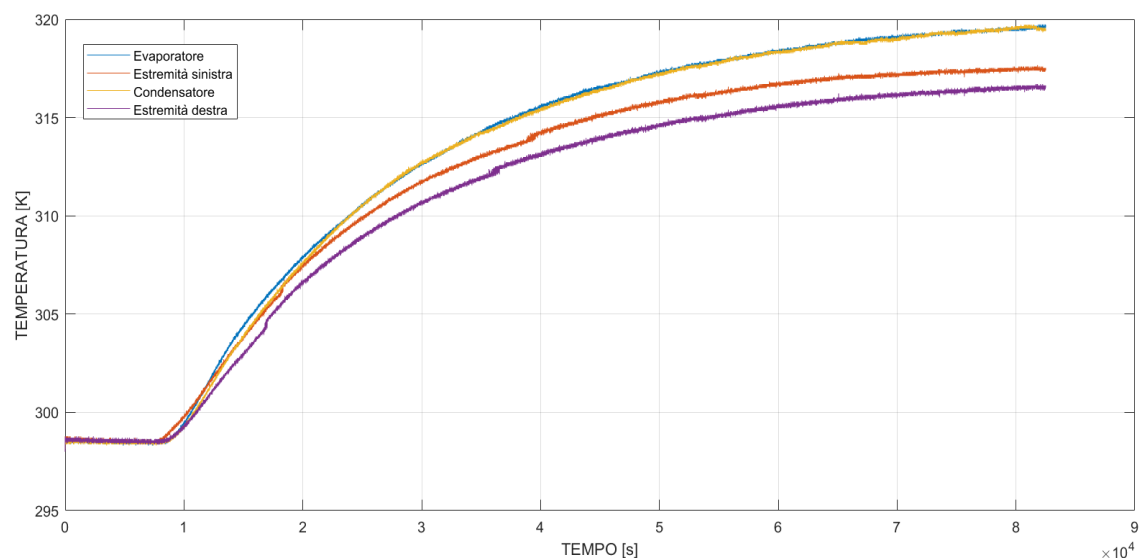


Figura 7.3 Test sperimentale on nominal heat pipe (posizione 5)

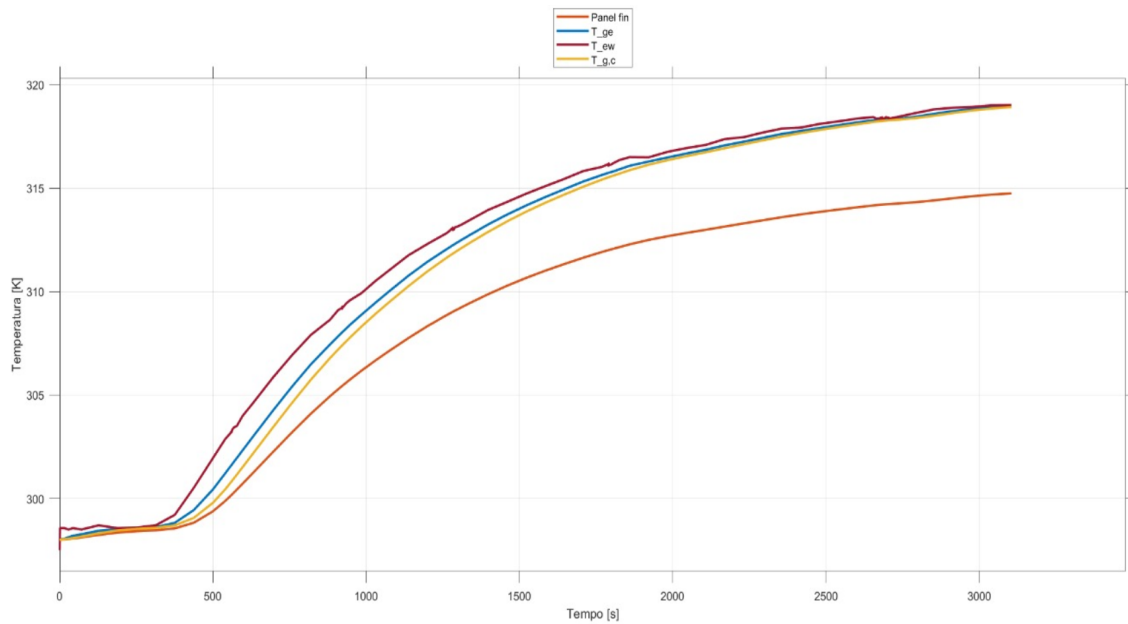


Figura 7.4 Test Simulink on nominal heat pipe (posizione 5)

In questa sezione vengono analizzati e confrontati gli andamenti termici relativi alla configurazione *nominal on* con la cartuccia termica collocata sull'estremità opposta dell'heat pipe (posizione 5-illustrato nel paragrafo dell'involucro isolante).

Anche in questa configurazione, le curve di temperatura ottenute mostrano un'elevata coerenza tra i risultati sperimentali e quelli numerici. Questo ci permette di dire che si evidenzia una buona corrispondenza del modello alle condizioni reali di prova. Tale concordanza conferma l'affidabilità dei sensori FBG nel monitoraggio termico in questo sistema piastra-heat pipe e ne supporta l'idoneità per applicazioni in ambito spaziale.

7.3 Configurazione off nominal (Heat pipe posizione 1)

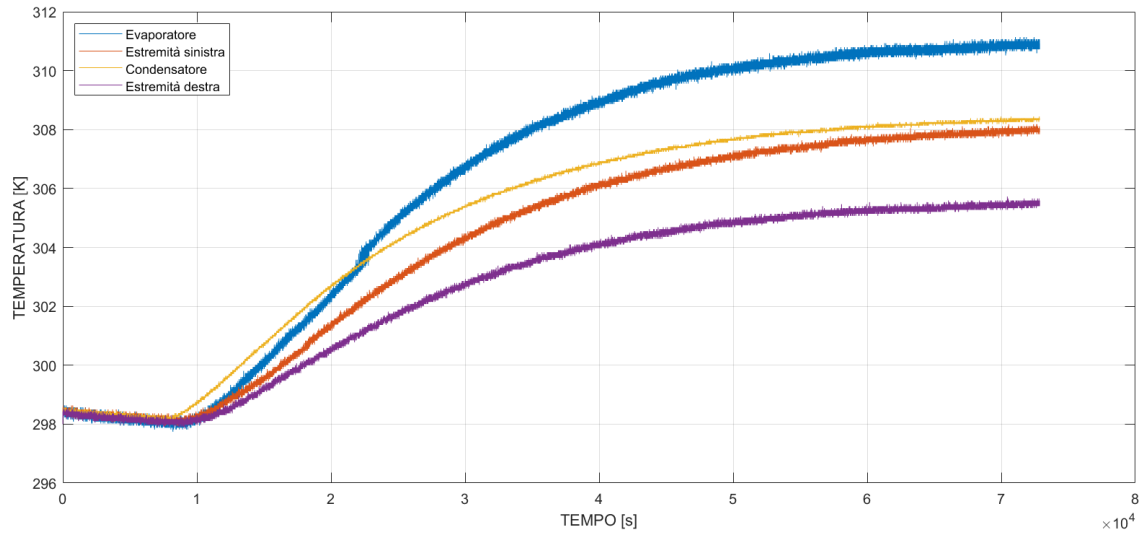


Fig. 7.5 Test sperimentale off nominal heat pipe (posizione 1)

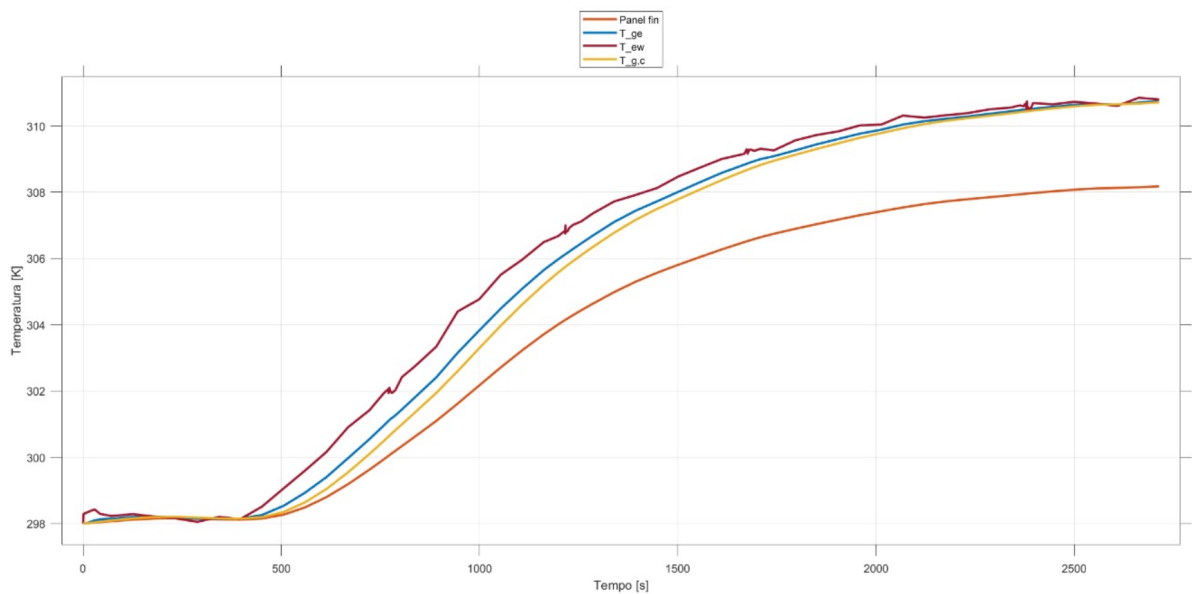


Figura 7.6 Test Simulink off nominal heat pipe (posizione 1)

Nella configurazione off-nominal, l'heat pipe è danneggiato e questo introduce una limitazione al trasferimento di calore tra le sezioni di evaporatore e condensatore. Questo comportamento anomalo è chiaramente visibile nel grafico: la temperatura del gas in evaporazione (linea blu) raggiunge valori sensibilmente superiori rispetto a quella del gas in condensazione (linea gialla). Questa dinamica

non si presenta nella configurazione *on-nominal* , condizione in cui l'heat pipe non è danneggiata e funziona correttamente.

Questa discrepanza risulta coerente con l'ipotesi di danneggiamento del condotto termico, non prevista nel modello numerico sviluppato in MATLAB, che si basa su un comportamento ideale dell'heat pipe. Tale differenza permette di diagnosticare eventuali anomalie di funzionamento attraverso il confronto tra le temperature simulate e quelle effettivamente misurate, individuando così deviazioni significative dai valori attesi.

Per quanto riguarda le temperature rilevate all'estremità della piastra, si osserva una buona corrispondenza con i risultati simulati, con valori prossimi ai 307 °C in entrambi i casi. Le leggere differenze riscontrate possono essere attribuite sempre alla non uniformità dell'isolante termico.

7.4 Configurazione off nominal (Heat pipe posizione 5)

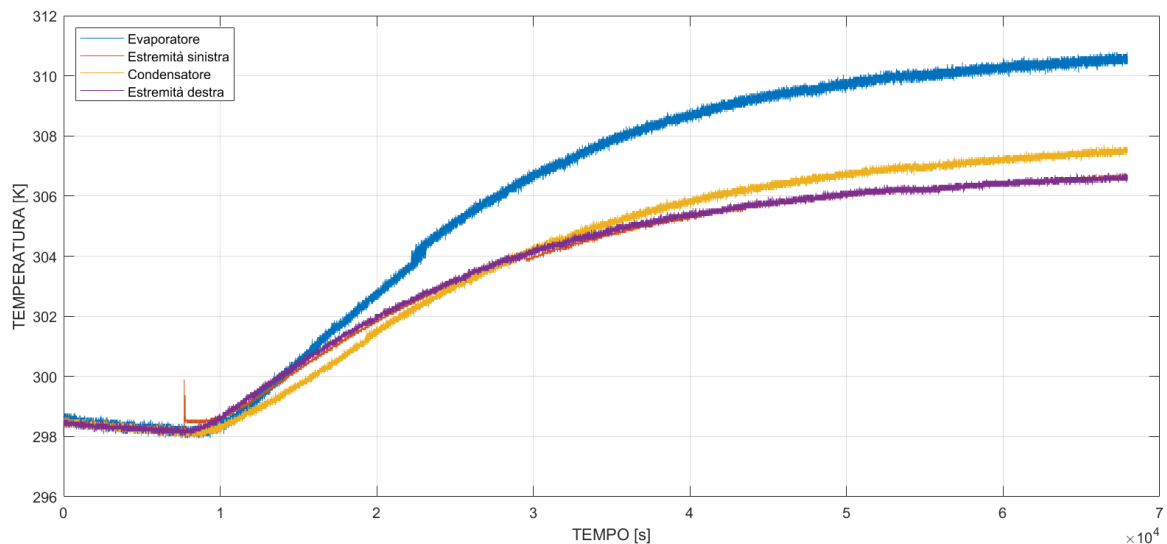


Figura 7.7 Test sperimentale off nominal heat pipe (posizione 5)

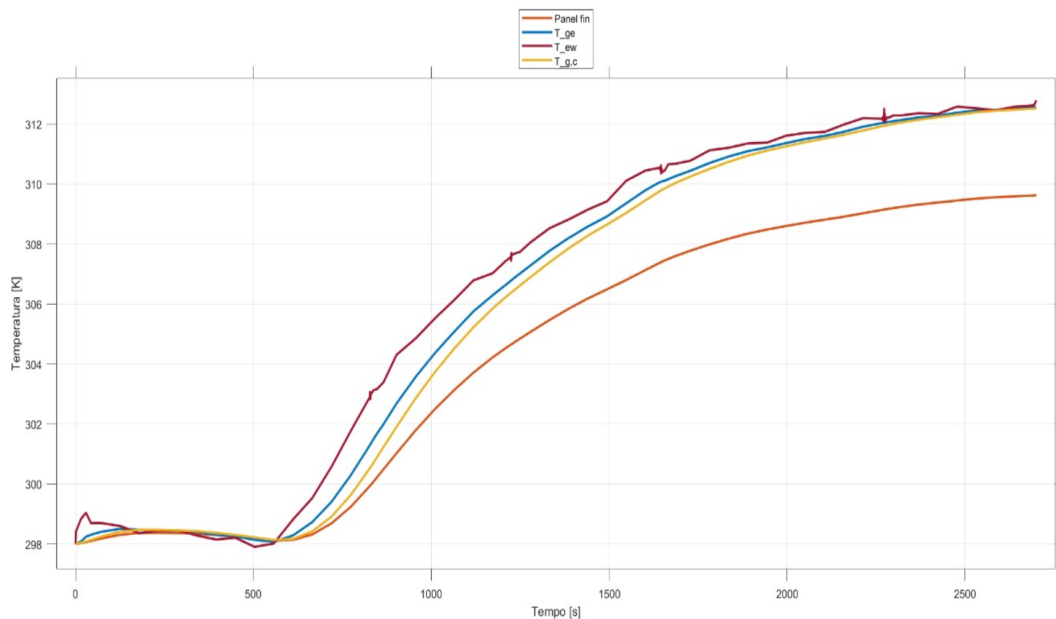


Figura 7.8 Test Simulink off nominal heat pipe (posizione 5)

In questo caso risulta ancora più evidente la difficoltà nel trasferimento di calore tra le sezioni di evaporatore e condensatore dell'heat pipe. La temperatura del gas in evaporazione raggiunge un valore di circa 312 °C (in accordo con quanto previsto dal modello Simulink) mentre la temperatura del gas nel condensatore si attesta intorno ai 308 °C.

Questo valore risulta solo di poco superiore a quella misurata alle estremità della piastra e si discosta di molto dalla temperatura prevista dal modello numerico, intorno ai 312 °C. Questo comportamento suggerisce dunque una ridotta efficienza di trasferimento termico dovuta al danneggiamento dell'heat pipe.

Per quanto concerne invece le temperature della piastra, si osserva una buona concordanza tra i valori ottenuti sperimentalmente e quelli previsti dal modello numerico, confermando la coerenza del comportamento termico globale al di fuori della sezione difettosa.

7.5 Criticità test

In questo paragrafo vengono affrontati le criticità nelle acquisizione dei test:

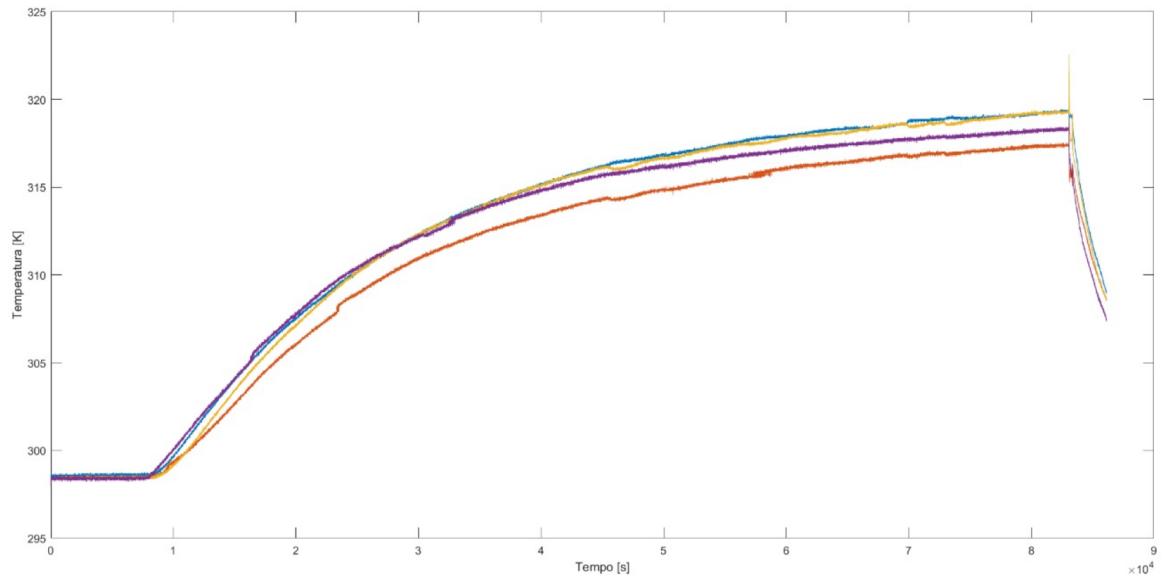


Figura 7.9 Grafico con errore di acquisizione

Il grafico evidenzia l'importanza di una raccolta dati accurata e controllata durante le prove sperimentali. In questo caso, un errore operativo — consistente nello scollegamento anticipato dell'alimentatore dell'interrogatore ottico — ha determinato un raffreddamento repentino della piastra, registrato dallo strumento come variazione reale di temperatura.

Tale evento ha introdotto dati anomali all'interno del set di misura, compromettendo la purezza e la confrontabilità dei risultati con le altre prove. Ciò è chiaramente visibile nella parte finale del grafico, dove si osserva un brusco calo della temperatura, accompagnato da oscillazioni e picchi negativi non riconducibili al comportamento fisico del sistema.

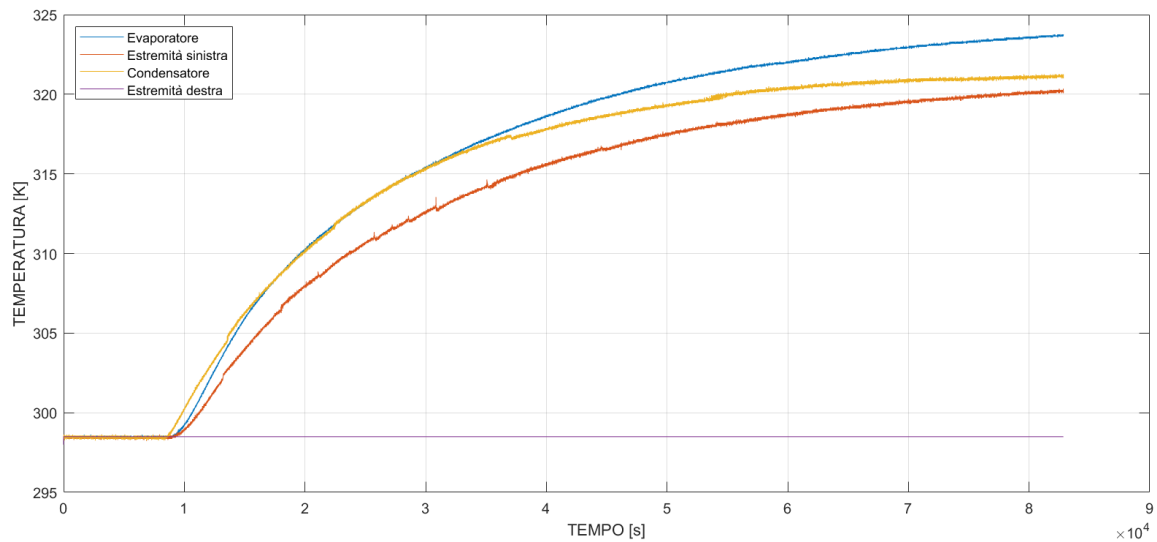


Figura 7.9 Grafico con errore di acquisizione

Durante l'ultimo ciclo di test della piastra in configurazione *on-nominal* si è verificata la perdita di segnale da parte di uno dei sensori FBG appartenenti a una delle linee di fibra ottica. Considerando che il sensore interessato era quello più vicino al lembo libero della piastra, è possibile dedurre che la frattura della fibra si sia verificata nel tratto compreso tra i due sensori adiacenti; diversamente, l'interruzione avrebbe coinvolto l'intera linea di misura.

Tale evento è chiaramente identificabile nel grafico, dove la traccia relativa al sensore guasto assume un andamento costante corrispondente alla temperatura ambiente, valore impostato nel codice MATLAB per consentire la corretta esecuzione dei calcoli anche in presenza di dati mancanti.

CONCLUSIONI

Il lavoro di tesi ci ha permesso di conseguire in maniera soddisfacente gli obiettivi prefissati ad inizio ricerca, confermando la validità dell'approccio integrato sperimentale–numerico adottato per l'analisi del comportamento termico del nostro problema di riferimento (piastra radiativa equipaggiata con *heat pipe* e sensori ottici FBG).

Il primo obiettivo consiste nella validazione dei sensori FBG per applicazioni aerospaziali. Questo obiettivo è stato conseguito attraverso un confronto sistematico tra i dati sperimentali e le simulazioni numeriche realizzate in ambiente MATLAB/Simulink. L'analisi comparativa dei risultati ci ha permesso di mettere in evidenza la forte analogia tra gli andamenti termici sperimentali e quelli del modello numerico. In questo modo si è dimostrato l'affidabilità dei sensori a reticolo di Bragg come strumenti idonei al monitoraggio termico per condizioni operative complesse.

Il secondo obiettivo era poter riconoscere e distinguere le configurazioni operative “on nominal” e “off nominal”. Anche questo obiettivo è stato raggiunto mediante un'attenta analisi comparativa tra le curve sperimentali acquisite durante le prove e le risposte simulate dal modello numerico. Il confronto ha mostrato differenze significative nella pendenza e nell'andamento temporale delle temperature, in particolare nella regione del condensatore, dove si osservano scostamenti marcati rispetto ai valori nominali. Tali variazioni si ricollegano alla presenza di un'anomalia nel trasferimento di calore — come nel caso di un *heat pipe* danneggiato — e permettono di identificare con chiarezza il comportamento non nominale del sistema. Questa analisi conferma come il modello sviluppato sia in grado di supportare la diagnostica precoce di malfunzionamenti, rappresentando un efficace strumento di verifica e validazione per sistemi termici spaziali.

In conclusione, il lavoro svolto ha dimostrato che l'integrazione di sensori FBG con una piattaforma di simulazione numerica avanzata costituisce una soluzione affidabile e innovativa per il monitoraggio termico passivo. I risultati ottenuti non solo confermano la coerenza tra modello e realtà fisica, ma aprono la strada a futuri sviluppi orientati all'ottimizzazione dei sistemi di controllo termico in ambito aerospaziale, con particolare attenzione all'implementazione di strategie predittive e di diagnostica automatizzata basate su sensori ottici e modelli di simulazione accoppiati.

Riferimenti bibliografici

[1] NASA, *Study of Thermal Management for Space Platform Applications*, NASA Technical Report 19810012577, 1980. [Online]. Available:

<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19810012577/downloads/19810012577.pdf>

[2] TE Connectivity, *Sensors in Space*. TE Connectivity, 2020. [Online]. Available:

<https://www.te.com/en/whitepapers/sensors/sensors-in-space.html>

[3] NASA, *50 Years Ago: Pioneer 10 Launches to Explore Jupiter*, 2022. [Online]. Available:

<https://www.nasa.gov/history/50-years-ago-pioneer-10-launches-to-explore-jupiter>

[4] I. McKenzie et al., "Fiber Optic Sensing in Spacecraft Engineering", *Frontiers in Physics*, 2021.

[5] D. A. Reay, *The Perkins Tube—a noteworthy contribution to heat*, 1982.

[6] *Basic Principles of Heat Pipes and History*, ResearchGate (varie ed.), "The original idea of the heat pipe was considered in 1944 by Gaugler

[7] G. P. Peterson, *An Introduction to Heat Pipes: Modeling, Testing, and Applications*, 1994.

[8] D. Reay, P. Kew e R. McGlen, *Heat Pipes: Theory, Design and Applications*, 6^a ed., Elsevier, 2014.

[9] Alhussein et al., "Fiber Bragg Grating Sensors: Design, Applications, and Challenges," *Sensors* (review), 2025.

[10] J. Chen, B. Liu e H. Zhang, "Review of fiber Bragg grating sensor technology," *Frontiers in Optoelectronics*, vol. 4, n. 2, pp. 204–212, 2011

[11] M. Dvorak, "The Use of FBG Sensors for Monitoring of the Composite Wing Structure," presentato ad ECNDT 2014

[12] Monitoring the propulsion system of PROBA-2 with optical fiber sensors during 8 years," pubblicato su ResearchGate

[13] A. Aimasso, C. G. Ferro, M. Bertone, M. D. L. Dalla Vedova, & P. Maggiore, *Fiber Bragg Grating Sensor Networks Enhance the In Situ Real-Time Monitoring Capabilities of MLI Thermal Blankets for Space Applications*, *Micromachines*, vol. 14, no. 5, 2023, doi:10.3390/mi1405092

Appendici

Codici Matlab:

Main.m

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% main.m %
% parameters initialization %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
close all
% clear all
clc
%% Constants
sigma = 5.67e-8; %[W m^-2 K^-4] costante di Stefan-Boltzmann
%% Ambient properties
% T_p = 273.15 + 300; %[K] center panel (MAX) temperature
T_a = 150; %[K] radiation sink temperature
T_pa = 150; %[K] initial panel temperature
T_w = 273.15 + 300; %[K] wall temperature outside heatpipe
%% Panel segment properties
L_p = 0.1; % 0.1 [m] length
h_p = 0.0005; % 0.0005 [m] thickness
b_p = 0.15; % 0.15 [m] span
rho_p = 2700; % 2.700 [Kg/m^3] density
cp_p = 896.9; % 900 [J/(kg*K)] specific heat
epsilon_p = 0.85; % 0.03-0.1 [%] surface emissivity
k_p = 237; % 205-237 [W/(m*K)] thermal conductivity
%% Junction panel-heatpipe properties
h_j = 0.064; % 0.064 [m] thickness
k_j = 8.5; % 8.5 [W/(m*K)] thermal conductivity
rho_j = 2500; % 2.5[g/cm^3] [Kg/m^3] density
cp_j = 1050; % 950-1050 (stimato) [J/(kg*K)] specific heat
%% Heatpipe properties
r_j = 0.0025; % 0.0027 0.0025 x [m] outer heatpipe radius % Questi primi tre si
ricavano dal datashit del hp
h_ha = 0.0005; % 0.0003 0.0005 x [m] wall thickness
h_hi = 0.0006; % 0.00018 0.0006 x [m] wick thickness
L_e = 0.3; % 30%:0.3 30 [%] evaporator percentage length
L_a = 0.4; % 40%:0.4 40 [%] adiabatic percentage length
L_c = 0.3; % 30%:0.3 30 [%] condenser percentage length
rho_ha = 8960; % 8900 8960 v [Kg/m^3] wall density
rho_hi = 8960; % 8900 8960 v [Kg/m^3] wick density % DA CALCOLARE sono da
aggiungere
rho_g = 8960; % 0.6 0.6 v [Kg/m^3] vapor density % DA CALCOLARE sono da
aggiungere
cp_ha = 385; % 386 385 v [J/(kg*K)] wall specific heat
```

```

cp_hi = 385; % 386 385 v %[J/(kg*K)] wick specific heat % DA CALCOLARE rapporto
composito
cp_g = 2000; % 1880 2000 v %[J/(kg*K)] vapor specific heat % DA CALCOLARE rapporto
composito
k_ha = 401; % 401 400 v %[W/(m*K)] wall thermal conductivity
k_hi = 150; % 50 200 x %[W/(m*K)] wick thermal conductivity % DA CALCOLARE rapporto
percentuale acqua rame
% Obiettivi : Taratura della cartuccia termica
% finire la parte di copertura
% Conduttività termica dell'isolante circa 0.040 W/mK
%%
% % Eseguo la simulazione
% out = sim("model");

```

Prove0103.m

```

%% Import data from text file
% Script for importing data from the following text file:
%
% filename: C:\Users\andre\Desktop\Sillicani\PROVE
SPERIMENTALI\1.BOMBATA\2\20250711-1144_prova0103.log
%
% Auto-generated by MATLAB on 05-Aug-2025 16:27:22
clear all
%% Set up the Import Options and import the data
opts = delimitedTextImportOptions("NumVariables", 21);
% Specify range and delimiter
opts.DataLines = [6, Inf];
opts.Delimiter = "\t";
% Specify column names and types
opts.VariableNames = ["StartTimeUTC1752227093986713", "Var2", "Var3", "Var4",
"Var5", "Var6", "Var7", "Var8", "Var9", "Var10", "Var11", "VarName12",
"VarName13", "Var14", "Var15", "Var16", "VarName17", "VarName18", "Var19",
"Var20", "Var21"];
opts.SelectedVariableNames = ["StartTimeUTC1752227093986713", "VarName12",
"VarName13", "VarName17", "VarName18"];
opts.VariableTypes = ["double", "string", "string", "string", "string", "string",
"string", "string", "string", "string", "string", "double", "double", "string",
"string", "string", "double", "double", "string", "string", "string"];
% Specify file level properties
opts.ExtraColumnsRule = "ignore";
opts.EmptyLineRule = "read";
% Specify variable properties
opts = setvaropts(opts, ["Var2", "Var3", "Var4", "Var5", "Var6", "Var7", "Var8",
"Var9", "Var10", "Var11", "Var14", "Var15", "Var16", "Var19", "Var20", "Var21"],
"WhitespaceRule", "preserve");
opts = setvaropts(opts, ["Var2", "Var3", "Var4", "Var5", "Var6", "Var7", "Var8",
"Var9", "Var10", "Var11", "Var14", "Var15", "Var16", "Var19", "Var20", "Var21"],
"EmptyFieldRule", "auto");

```

```

opts = setvaropts(opts, ["StartTimeUTC1752227093986713", "VarName12", "VarName13",
"VarName17", "VarName18"], "TrimNonNumeric", true);
opts = setvaropts(opts, ["StartTimeUTC1752227093986713", "VarName12", "VarName13",
"VarName17", "VarName18"], "DecimalSeparator", ",");
opts = setvaropts(opts, ["StartTimeUTC1752227093986713", "VarName12", "VarName13",
"VarName17", "VarName18"], "ThousandsSeparator", ".");
% Import the data
prova = readtable("C:\Users\andre\Desktop\Sillicani\PROVE
SPERIMENTALI\1-BOMBATA\4\20250716-1527_prova0407.log", opts);
%% Clear temporary variables
clear opts

```

AcquisizionemodificheT.m

```

% % Salvo il workspace in un file MAT
% save('workspace.mat');
%% Import data from text file
% Script for importing data from the following text file:
%
%filename: C:\Users\andre\Desktop\Sillicani\Prove iniziali
bombata\20250414-1150_testprova0008.log
%
% Auto-generated by MATLAB on 08-Apr-2025 16:52:29
%% Set up the Import Options and import the data
clc
opts = delimitedTextImportOptions("NumVariables", 9);
% Specify range and delimiter
opts.DataLines = [6, Inf];
opts.Delimiter = "\t";
% Specify column names and types
opts.VariableNames = ["StartTimeUTC1744116797951329", "VarName2", "VarName3",
"VarName4", "VarName5", "VarName6", "VarName7", "VarName8", "VarName9"];
opts.VariableTypes = ["double", "double", "double", "double", "double", "double",
"double", "double", "double"];
% Specify file level properties
opts.ExtraColumnsRule = "ignore";
opts.EmptyLineRule = "read";
% Specify variable properties
opts = setvaropts(opts, ["StartTimeUTC1744116797951329", "VarName2", "VarName3",
"VarName4", "VarName5", "VarName6", "VarName7", "VarName8", "VarName9"],
"TrimNonNumeric", true);
opts = setvaropts(opts, ["StartTimeUTC1744116797951329", "VarName2", "VarName3",
"VarName4", "VarName5", "VarName6", "VarName7", "VarName8", "VarName9"],
"DecimalSeparator", ",");
opts = setvaropts(opts, ["StartTimeUTC1744116797951329", "VarName2", "VarName3",
"VarName4", "VarName5", "VarName6", "VarName7", "VarName8", "VarName9"],
"ThousandsSeparator", ".");
% Import the data

```

```

%FBG = readtable("C:\Users\andre\Desktop\Sillicani\Prove iniziali
bombata\bombata\1\20250715-1501_20250711-1547_prova030725.log", opts);
%% Convert to output type
FBG = table2array(prova);
%% Clear temporary variables
clear opts
C=[0.0119 0.0111 0.0122 0.0111 0.0102 0.0124 0.0113 0.0119;1539.7 1529.6 1539.8
1529.6 1542.25 1529.88 1540.04 1529.88];
FBGT= zeros(size(FBG,1), 9);
FBGR=zeros(1,8);
Tmisura=input("Inserire temperatura ambiente:");
t=size(FBG,2)-1;
FBGT(1,2:9)=Tmisura+273;
FBGT(:,1)=FBG(:,1);
for i=1:t
for j=2:length(FBG(:,i))
FBGT(j,i+1)=(Tmisura+(FBG(j,i+1)-FBG(1,i+1))/C(1,i))+273.5;
if FBGT(j,i+1)<0
FBGT(j,i+1)=0;
else
FBGT(j,i+1)=FBGT(j,i+1);
end
end
end
% Esempio: t = vettore tempo, FBGT = matrice temperature (N×4)
save('heatpipe_dati.mat','t','FBGT') % salva in formato MAT
% Considera solo le colonne dalla 2 in poi
subMat = FBGT(:, 2:end);
% Trova l'ultimo valore massimo nella sottomatrice
max_val = max(subMat(:));
idx = find(subMat == max_val, 1, 'last');
% Converte l'indice lineare in riga e colonna
[~, col_sub] = ind2sub(size(subMat), idx);
% Correggi l'indice per riportarlo alla matrice originale
col = col_sub + 1;
% estrai tempo e temperatura
time = FBGT(:,1); % prima colonna
Temp = FBGT(:,col); % seconda colonna (o cambia indice se serve un'altra)
% prepara matrice [time Temp] per Simulink
inputData = [time Temp];
duration=FBGT(end,1);

```

Grafici Sperimentali :

Legenda

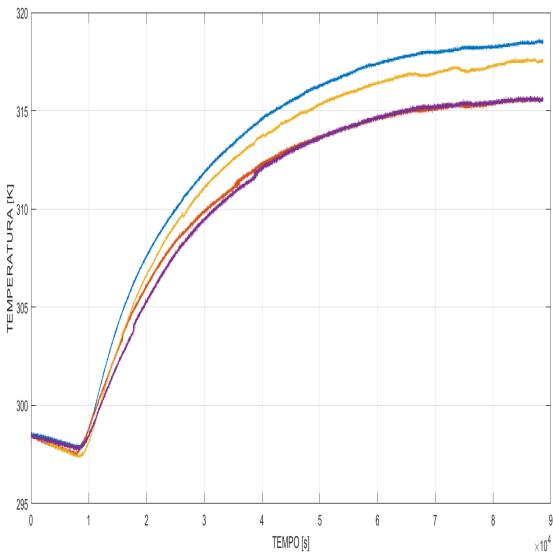
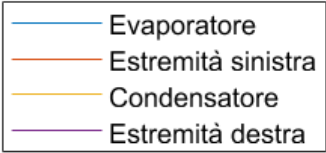


Figura 8.1 Heat pipe (1) on nominal

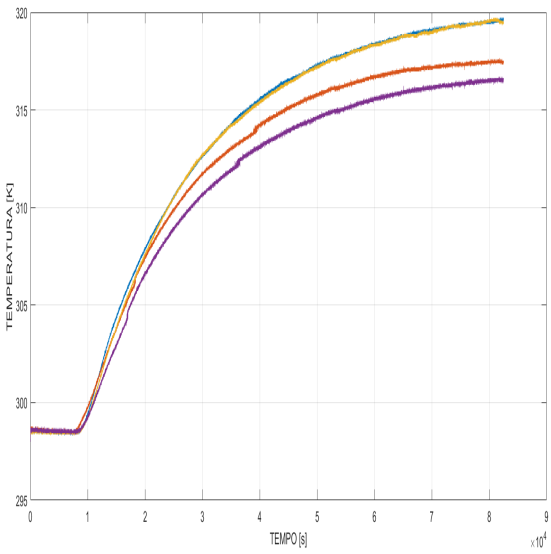


Figura 8.2 Heat pipe (5) on nominal

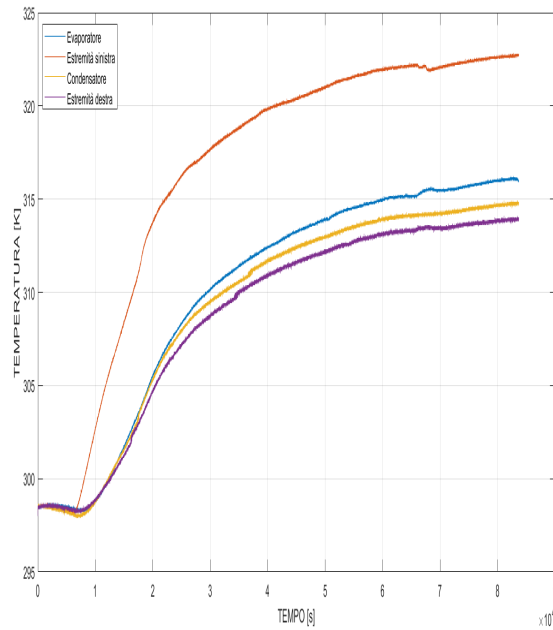


Figura 8.3 Estremità sx on nominal

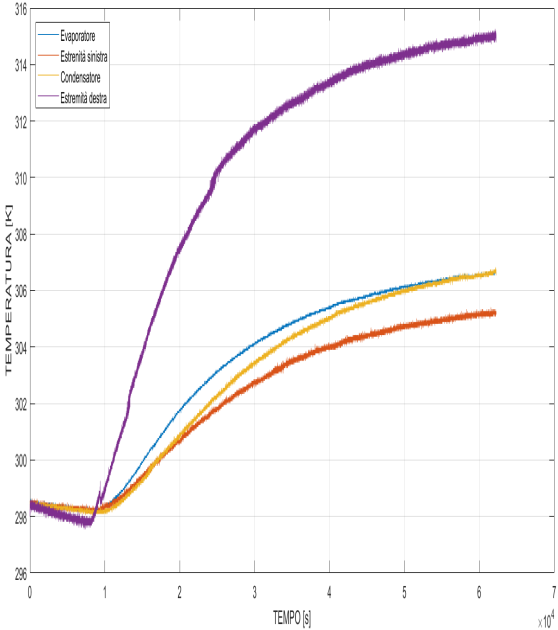


Figura 8.4 Estremità sx on nominal

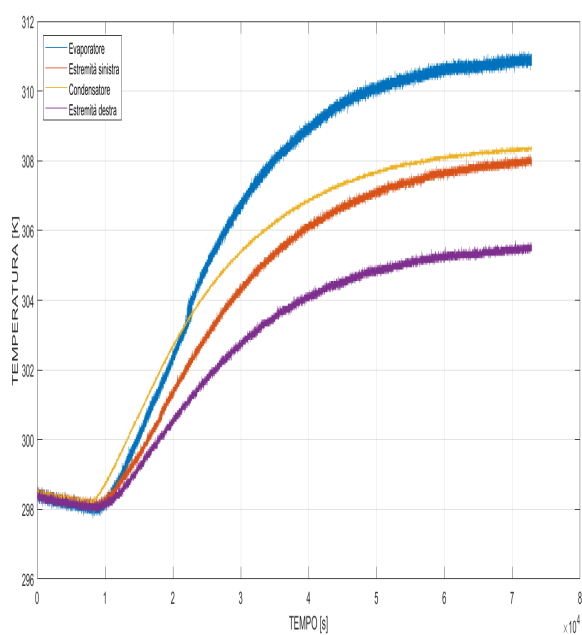


Figura 8.5 Heat pipe (1) off nominal

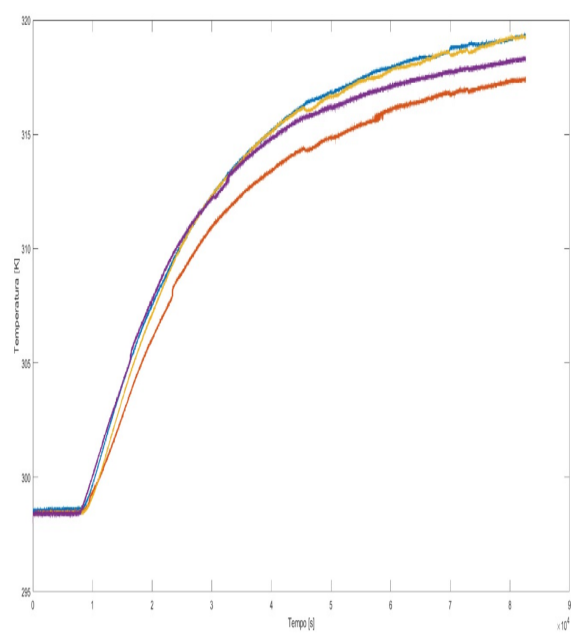


Figura 8.6 Heat pipe (5) off nominal

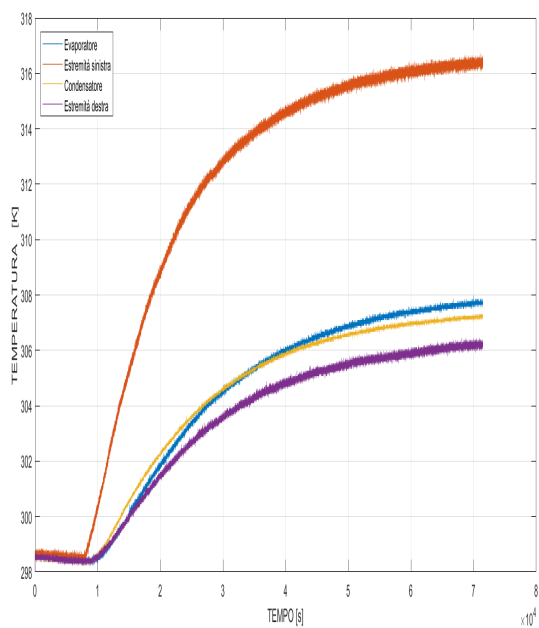


Figura 8.7 Estremità sx off nominal

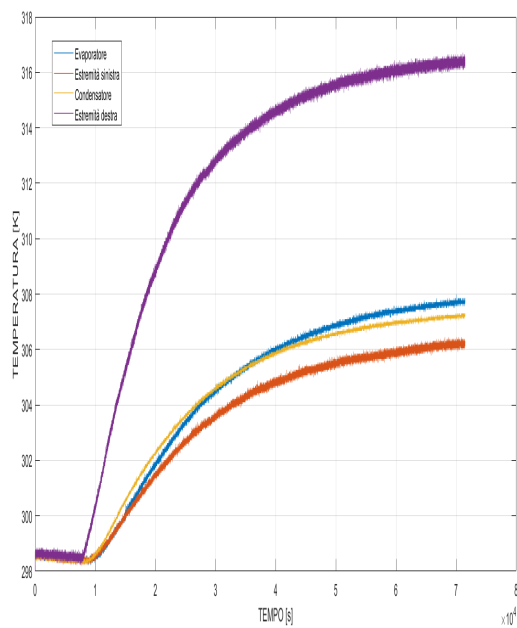


Figura 8.8 Estremità sx off nominal

Grafici Simulink :

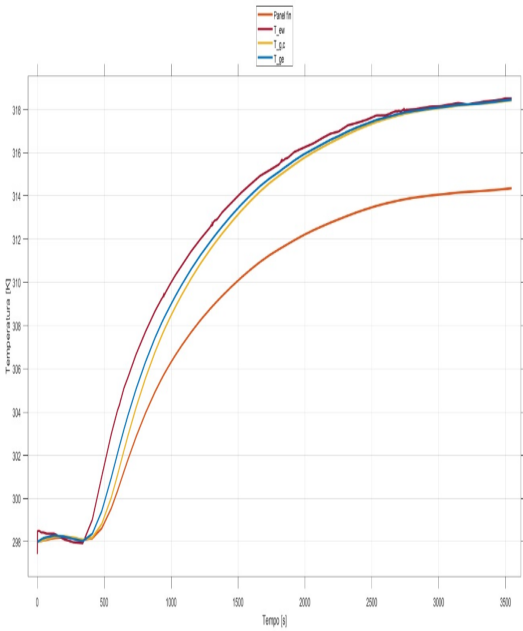


Figura 8.9 Heat pipe (1) on nominal

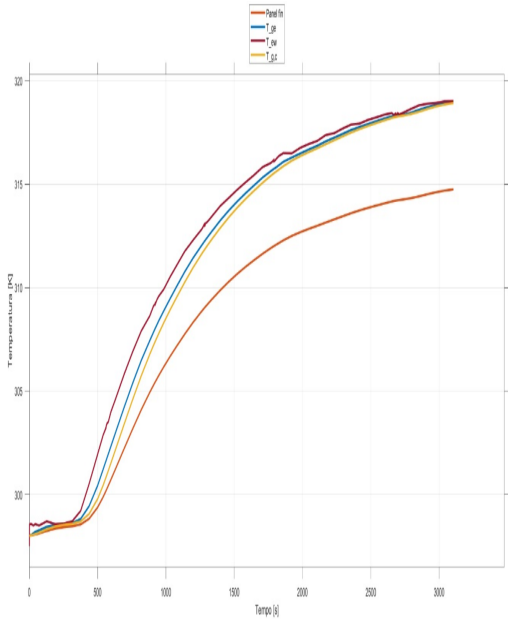


Figura 8.10 Heat pipe (5) on nominal

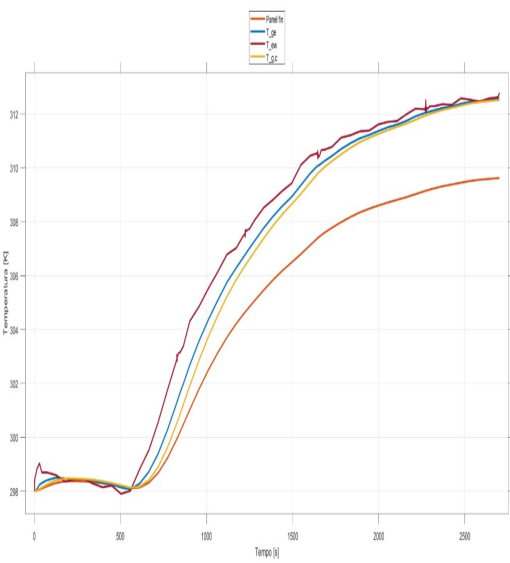


Figura 8.9 Heat pipe (1) on nominal

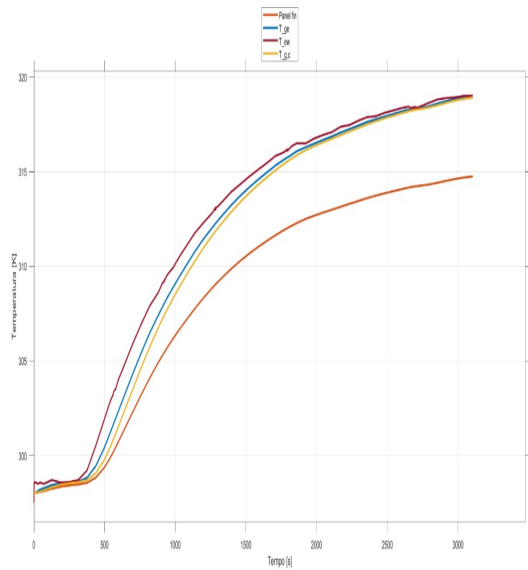


Figura 8.10 Heat pipe (5) on nominal

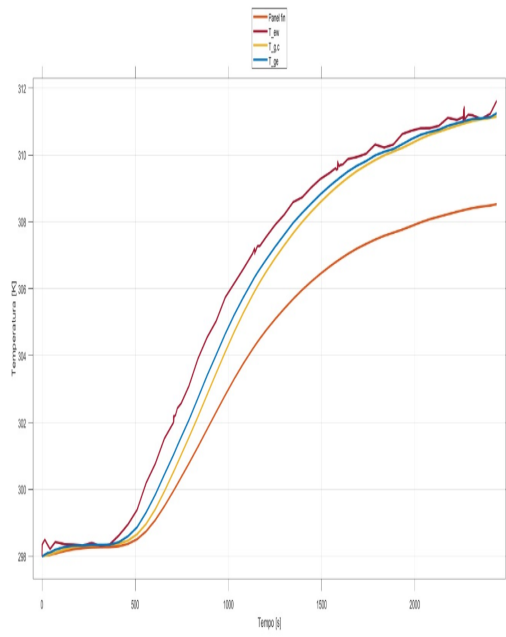


Figura 8.11 Heat pipe (1) off nominal

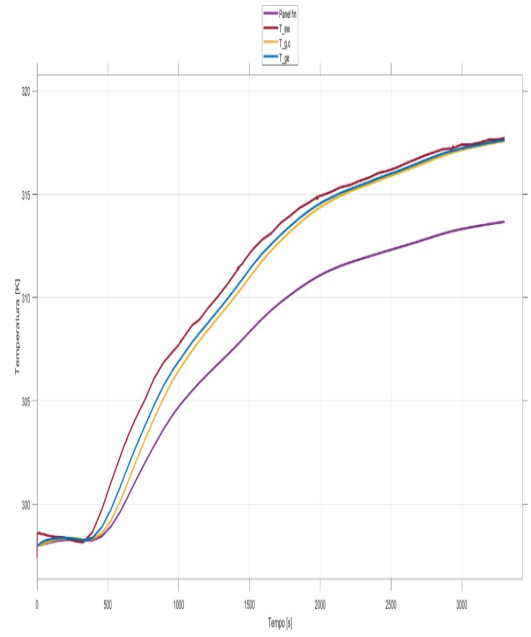


Figura 8.12 Heat pipe (5) off nominal

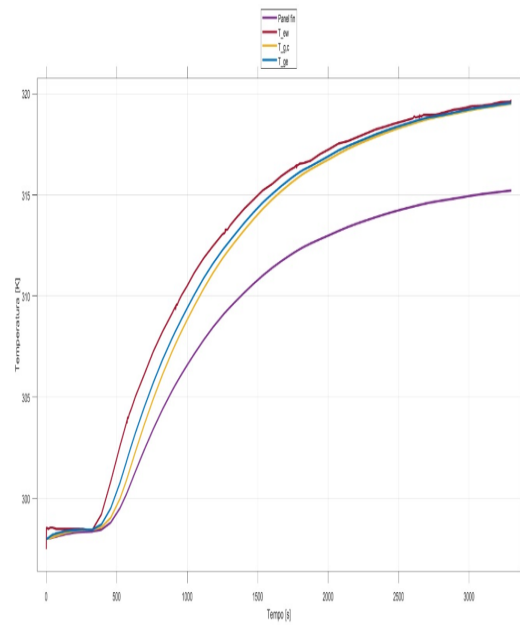


Figura 8.12 Heat pipe (1) off nominal

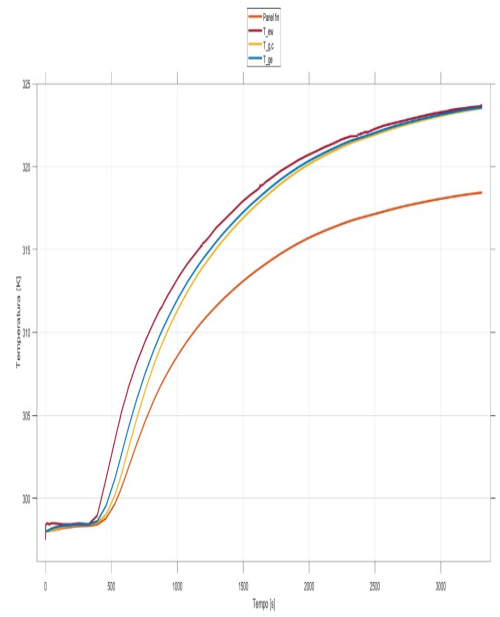


Figura 8.13 Heat pipe (5) off nominal