

ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BOLOGNA

---

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea in INGEGNERIA MECCANICA

Tesi di Laurea in FISICA GENERALE T-A

**Simulazione e misura della  
dispersione del calore in una  
scheda elettronica di front-end  
per rivelatori di fisica nucleare**

Candidato:  
Valerio Farolfi

Relatore:  
Prof. Mauro Bruno  
Correlatore:  
Ing. Marco Guerzoni

---

Anno Accademico 2009/2010 - Sessione II



# Indice

<b>1</b>	<b>FAZIA</b>	<b>7</b>
1	Introduzione . . . . .	7
2	Produzione di fasci di ioni radioattivi . . . . .	8
3	Collaborazione FAZIA . . . . .	10
4	Sistema di rivelazione . . . . .	12
4.1	Apparato . . . . .	12
4.2	Telescopio . . . . .	13
5	Scheda di front-end . . . . .	15
<b>2</b>	<b>Strumenti di calcolo</b>	<b>19</b>
1	Metodo agli elementi finiti . . . . .	19
1.1	Descrizione del metodo . . . . .	19
	Condizioni al contorno . . . . .	21
2	Software . . . . .	22
2.1	Pacchetto Comsol Multiphysics (© Comsol, Ab) . . . . .	22
	Geometria . . . . .	23
	Parametri ed equazioni . . . . .	23
	Condizioni al contorno . . . . .	23
	Mesh . . . . .	23
	Solver . . . . .	24
	Convergenza ed errori . . . . .	25
3	Trasmissione del calore e sua modellazione . . . . .	26
3.1	Caratteristiche di scambio . . . . .	26
3.2	Conduzione . . . . .	27
4	Condizioni al contorno adottate nei modelli a seguire . . . . .	27

<b>3</b>	<b>Considerazioni preliminari</b>	<b>29</b>
1	Conducibilità termica PCB . . . . .	29
1.1	Modello di una singola resistenza . . . . .	30
	Proprietà dei sottodomini . . . . .	30
	Condizioni al contorno . . . . .	31
	Risultati . . . . .	31
2	Semplificazione geometrica della resistenza . . . . .	32
2.1	Modello di una singola resistenza . . . . .	32
	Proprietà dei sottodomini, condizioni al contorno e ri- sultati . . . . .	32
3	Contatto mensola-piastra raffreddante . . . . .	34
3.1	Modello semplificato . . . . .	35
	Proprietà dei sottodomini, condizioni al contorno e ri- sultati preliminari . . . . .	35
	Intervento sul contorno e risultati . . . . .	36
<b>4</b>	<b>Validazione del modello FEM sulla scheda di test</b>	<b>39</b>
1	Sottodomini e loro proprietà . . . . .	39
2	Condizioni al contorno . . . . .	41
3	Risultati . . . . .	42
3.1	Analisi dei risultati . . . . .	44
<b>5</b>	<b>Modello della scheda di front-end. Ultima versione proposta</b>	<b>51</b>
1	Sottodomini e loro proprietà . . . . .	51
2	Condizioni al contorno . . . . .	53
3	Risultati . . . . .	54
3.1	Analisi dei risultati . . . . .	60
	<b>Conclusioni</b>	<b>61</b>
<b>A</b>	<b>Disegni delle parti</b>	<b>63</b>
<b>B</b>	<b>Test eseguiti a Napoli</b>	<b>67</b>
1	Test in aria . . . . .	67
1.1	Descrizione del sistema . . . . .	67
1.2	Risultati . . . . .	68

<i>INDICE</i>	5
2 Test in vuoto. Descrizione sistema e risultati . . . . .	70
<b>C Interpolazioni temperature parete</b>	<b>75</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>77</b>



# Capitolo 1

## FAZIA

### 1 Introduzione

I nuclei stabili presenti in natura sono meno di trecento e, rappresentati nel diagramma di Segrè (Figura 1.1), in cui  $N$  è il numero di neutroni e  $Z$  il numero di protoni del nucleo rappresentato, formano la cosiddetta “*valle di stabilità*” [1].

Attorno a questa zona si trovano i nuclei prodotti artificialmente aggiun-

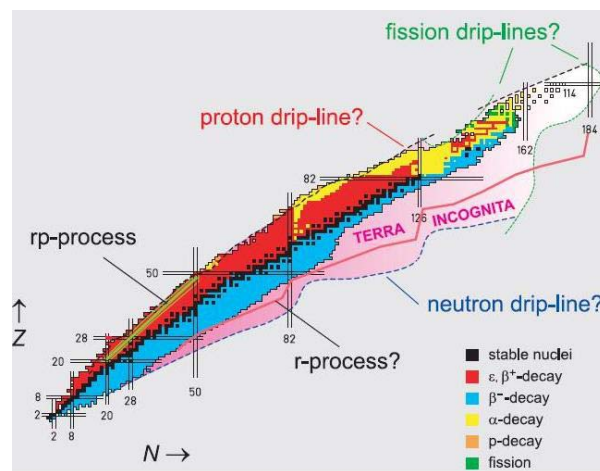


Figura 1.1: Diagramma di segrè

do protoni o neutroni:

- continuando ad aggiungere *protoni* si arriva ad un punto in cui la forza nucleare forte assume intensità trascurabili rispetto alla repulsione

coulombiana ed il nucleo diventa completamente instabile: *drip-line* dei protoni.

- Aggiungendo *neutroni* la carica elettrica è sempre più schermata, ma la forza forte cala a causa della grande distanza tra i nucleoni ed i nuclei diventano comunque instabili: *drip-line* dei neutroni.

Dalle drip-lines in poi viene a mancare un vero e proprio legame nucleare ed i nucleoni in eccesso vengono emessi molto rapidamente per formare nuclei più leggeri ma più vicini alla valle di stabilità[3].

Ad oggi nei laboratori sono stati ottenuti circa tremila nuclei mentre ne è prevista l'esistenza di più di seimila, cosicché esiste una grande regione sconosciuta, detta "*terra incognita*", che si estende soprattutto nella regione dei nuclei ricchi di neutroni ed in quella dei nuclei superpesanti<sup>1</sup>, ancora da esplorare[1].

Un settore in intenso sviluppo per la fisica nucleare delle energie basse ed intermedie, è quello che riguarda la produzione di fasci di ioni esotici (*RIBs* - Radioactive Ion Beams) da utilizzare per lo studio di reazioni e della struttura di sistemi nucleari lontani dalla valle di stabilità.

Per quanto riguarda la fisica nucleare, lo studio di nuclei esotici che raggiungono le drip-lines, può portare ad interessanti risultati legati a nuovi aspetti, sia della struttura nucleare che della dinamica delle reazioni.

Per quanto riguarda l'aspetto tecnologico ed applicativo, si ha la produzione di acceleratori di nuova generazione, lo sviluppo di tecniche di estrazione di ioni esotici con buona efficienza, lo studio di materiali per i bersagli, come i carburi di uranio, e lo sviluppo di soluzioni per il controllo delle radiazioni in ambienti ad alta attività[3].

## 2 Produzione di fasci di ioni radioattivi

Di seguito una breve descrizione dei metodi ISOL (Isotope Separation On-Line) ed In-Flight usati per la produzione di fasci di ioni radioattivi.

- **ISOL**: un fascio di ioni (detto "primario") bombarda un bersaglio di spessore tale da frenare il fascio stesso. I prodotti di reazione diffondono

---

<sup>1</sup>cioè più pesanti del nucleo dell'uranio

sino alla superficie del bersaglio, da dove vengono emessi e trasferiti ad una sorgente che li ionizza. A tal scopo è molto importante la porosità del bersaglio che possa permettere l'emissione dei nuclei prodotti e minimizzare l'assorbimento.

Gli ioni radioattivi così ottenuti, sono estratti e pre-accelerati per la successiva separazione in massa. Un successivo acceleratore (o post-acceleratore) fornisce allo ione radioattivo separato l'energia incidente finale. I RIBs così prodotti vengono inviati su di un bersaglio secondario per indurre reazioni nucleari e realizzare gli esperimenti.

Questa tecnica si limita a fasci di ioni radioattivi aventi lunghe vite medie, maggiori di 1 ms, a causa del tempo necessario ad estrarre i nuclei radioattivi dal bersaglio principale ed a trasportarli nella sorgente di ioni. Tuttavia, l'ISOL produce RIBs di elevata qualità in un ampio intervallo di energie.

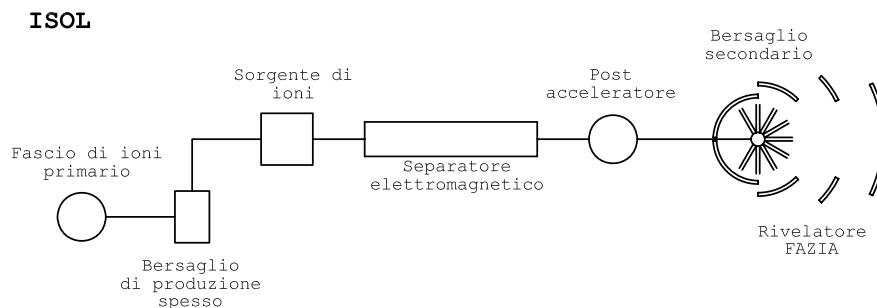


Figura 1.2: Schema metodo ISOL

- **In-Flight:** il fascio primario viene fatto incidere su di un bersaglio sottile (detto “bersaglio di produzione”). I prodotti di reazione, così ottenuti, possiedono una velocità prossima a quella del fascio primario. Tali frammenti vengono poi selezionati in volo attraverso un separatore magnetico (“fragment recoil separator”) secondo le loro masse e cariche ed infine vengono diretti su di un bersaglio secondario per indurre reazioni nucleari e realizzare gli esperimenti.

Questa tecnica permette di produrre RIBs aventi brevi vite medie, fino ad alcune centinaia di nanosecondi. Tali fasci risultano comunque di bassa qualità e sono limitati ad energie vicine a quelle del fascio primario.

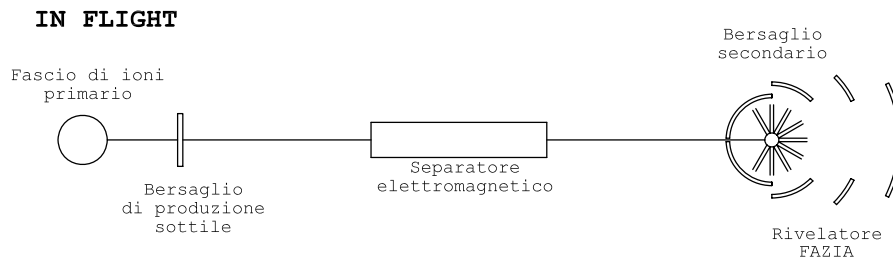


Figura 1.3: Schema metodo In-Flight

Per la sezione si è fatto riferimento a [1] e [4].

### 3 Collaborazione FAZIA

Nell'aprile 2006 è nata la Collaborazione internazionale FAZIA fra Italia, Francia, Spagna, Polonia e Romania per la ricerca e lo sviluppo di rivelatori di nuova generazione che abbiano prestazioni di risoluzione ed identificazione delle particelle rivelate molto superiori a quelle degli apparati esistenti, in modo da poter essere utilizzati per esperimenti con fasci instabili, prodotti dagli acceleratori che sono in corso di progettazione e costruzione come FAIR presso il GSI di Darmstadt (Germania), Spiral II presso Ganil di Caen (Francia) e SPES presso i Laboratori Nazionali di Legnaro[2].

Il sistema di rivelazione adatto a questo tipo di indagini deve permettere di ottenere informazioni nel più ampio intervallo possibile sulla carica e la massa di tutti i frammenti emessi nelle reazioni studiate.

Gli apparati esistenti hanno alcune caratteristiche che li rendono inadeguati per misure significative con questi nuovi acceleratori. In particolare:

- la trasportabilità degli apparati è in genere difficoltosa poiché non sono stati progettati con questa prospettiva, che invece è necessaria per poter sfruttare al meglio le opportunità offerte in futuro nelle varie sedi.
- eventuali accoppiamenti con rivelatori per neutroni, non essendo stati previsti all'epoca della costruzione, sono impossibili per la notevole quantità di materiale e per la sua dislocazione, che ne impedisce di fatto la loro misura

- i rivelatori e l'elettronica non sono stati progettati per ottenere le prestazioni migliori possibili con i diversi metodi di identificazione in massa e carica. L'elettronica utilizzata è ormai obsoleta e le sue prestazioni sono lontane da quelle oggi ottenibili con l'elettronica digitale.

Il progetto europeo FAZIA prevede la realizzazione di un apparato con le caratteristiche più avanzate al momento attuale, che sia trasportabile, in modo da poter essere utilizzato in diversi laboratori e che preveda una ottimizzazione dei materiali e della loro dislocazione per permettere misure future con apparati per la misura di neutroni.

Per quanto attiene la parte italiana della Collaborazione, le principali attività in FAZIA vedono coinvolti ricercatori inseriti nella sigla Nucl-ex (Bologna, Firenze, LNL e Napoli) ed esse possono essere classificate brevemente come segue:

- i. sviluppo di tecniche di Analisi di Forma dei segnali con tecniche digitali ovvero Digital Pulse Shape Analysis (DPSA) (Firenze).
- ii. Ottimizzazione e studio delle caratteristiche dei rivelatori al silicio da impiegare per la Pulse Shape (Firenze, Bologna, LNL e Napoli).
- iii. Ottimizzazione e studio dei cristalli di CsI(Tl). In questo ambito si studiano le caratteristiche di risposta agli ioni pesanti in funzione delle concentrazioni del drogante Tl ed i trattamenti/rivestimenti dei cristalli (Bologna, Firenze e LNL).
- iv. Studio delle possibili linee di ricerca da effettuare con il nuovo apparato oppure con parte dell'apparato, accoppiato con apparati esistenti.
- v. Studio delle configurazioni geometriche del futuro rivelatore, in stretta connessione con i casi fisici di interesse.
- vi. Sviluppo dell'Elettronica di Front End per la prima fase di ricerca e sviluppo. È in studio il sistema di supporto meccanico e quello di raffreddamento dell'elettronica (Firenze, Napoli e Bologna).
- vii. Studio di fattibilità per il miglioramento del preamplificatore attualmente impiegato da FAZIA.
- viii. Sviluppo di tecniche di acquisizione dati (Napoli, Firenze).

Il lavoro di questa tesi riguarda il punto vi..

## 4 Sistema di rivelazione

### 4.1 Apparato

L'apparato di rivelazione completo dovrebbe comprendere circa 600-700 blocchi, disposti come in figura 1.4, ciascuno composto da quattro moduli, ognuno dei quali composto da 4 telescopi, per un totale di circa 10000 telescopi.

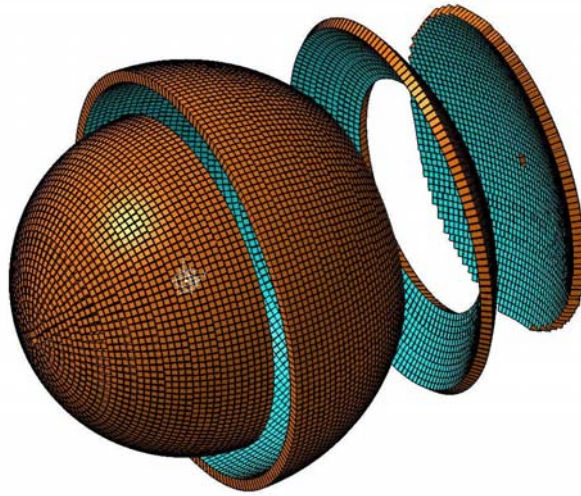


Figura 1.4: Disposizione finale dei rivelatori

Ogni blocco (figura 1.5) comprende la meccanica di fissaggio ed orientamento, l'elettronica per la prima elaborazione ed il sistema di raffreddamento di quest'ultima. L'elettronica di front-end è composta da otto schede disposte

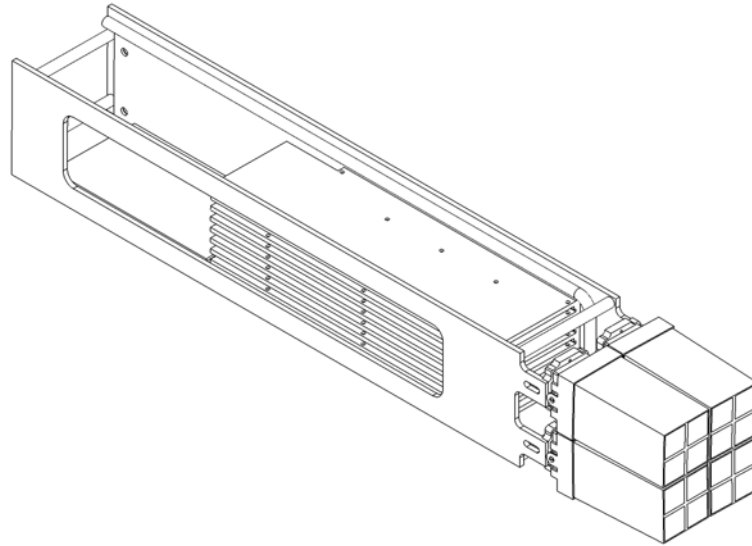


Figura 1.5: Blocco di quattro moduli con relativa meccanica ed elettronica

su altrettante mensole in lega di alluminio fissate ad una piastra di rame raffreddata a liquido.

## 4.2 Telescopio

Si prevede l'identificazione delle particelle emesse nelle reazioni nucleari mediante la tecnica  $\Delta E - E$ . L'apparato sperimentale per questo tipo di misura è costituito da un modulo (figura 1.6) di quattro telescopi formati da un rivelatore al silicio (spessore  $300\mu\text{m}$ ) anteposto ad un altro silicio (spessore  $500\mu\text{m}$ ), a sua volta anteposto ad uno scintillatore CsI(Tl).

Il funzionamento di un rivelatore a stato solido al silicio si basa essenzialmente su quello di una giunzione pn.

Ad un diodo a giunzione, attraverso dei contatti creati per impiantazione ai suoi lati, viene applicata una differenza di potenziale (bias) che lo polarizza inversamente in modo da allargare la regione di svuotamento. In questo modo quando una particella incide sul materiale, perdendo energia genera coppie

elettrone-lacuna dando quindi luogo ad un segnale elettrico.

Negli esperimenti di Fisica Nucleare i rivelatori al silicio vengono utilizzati anche per misurare la perdita di energia di particelle che attraversano tutto il rivelatore. Le tensioni di bias devono quindi essere tali da allargare la zona di svuotamento fino a riempire tutto il cristallo [6].

Lo spessore del primo silicio ( $300 \mu\text{m}$ ) è stato scelto per poter avere un rivelatore sufficientemente sottile con una buona risoluzione in energia (circa 0,3 %) e per poter essere utilizzato con la tecnica di identificazione  $\Delta E - E$ , ma con costi contenuti.

Il secondo è da  $500 \mu\text{m}$ , cioè sufficientemente spesso per poter fermare un gran numero di frammenti emessi nella reazione ed utilizzare tensioni di rivelazione non molto elevate.

Infine lo scintillatore CsI(Tl) usato come terzo stadio consente la rivelazione di particelle leggere molto energetiche che passano attraverso i primi due stadi di rivelatori al silicio. Gli scintillatori hanno costi molto più contenuti rispetto a rivelatori al silicio di grande spessore.

Il telescopio nel suo complesso deve essere in grado di fermare al suo interno (in un qualunque stadio) tutte le particelle ed i frammenti emessi in una reazione per poterli identificare isotopicamente (cioè determinare carica e massa).

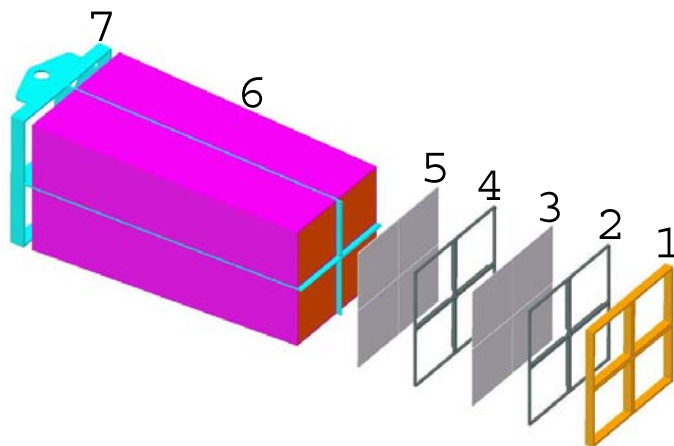


Figura 1.6: Singolo modulo, vista esplosa. In ordine: 1) assorbitore in ottone; 2) distanziale; 3) rivelatori al silicio da  $300 \mu\text{m}$ ; 4) distanziale; 5) rivelatori al silicio da  $500 \mu\text{m}$ ; 6) scintillatori CsI(Tl); 7) struttura di sostegno

## 5 Scheda di front-end

Le schede di front-end eseguono l'amplificazione ed una prima elaborazione dei segnali provenienti dai telescopi e consentono di inviare il risultato della pre-elaborazione al sistema di memorizzazione dati.

Ai fini di una simulazione termica preliminare, non è importante conoscere esattamente lo schema dei circuiti che, peraltro, essendo in fase di sviluppo, è in continua evoluzione, ma uno schema delle potenze di massima.

Gli sviluppatori dell'hardware (IPN di Orsay ed INFN di Napoli) hanno così inviato il lay-out di massima della distribuzione dei componenti e loro relativa potenza termica (Figura 1.7).

Non essendo definitiva nel disegno, la realizzazione di un prototipo, al solo fine di eseguire dei test sulle temperature massime raggiungibili, risulterebbe inutilmente dispendiosa.

Per i test si sono quindi utilizzate delle schede con sole resistenze disposte in modo da simulare termicamente i componenti che verranno effettivamente utilizzati.

Sempre su indicazione degli sviluppatori, sono stati realizzati i prototipi semplificati, i cui lay-out e descrizione dei componenti sono indicati in Figura 1.8



Figura 1.7: Lay-out di massima con potenze termiche. Scheda definitiva

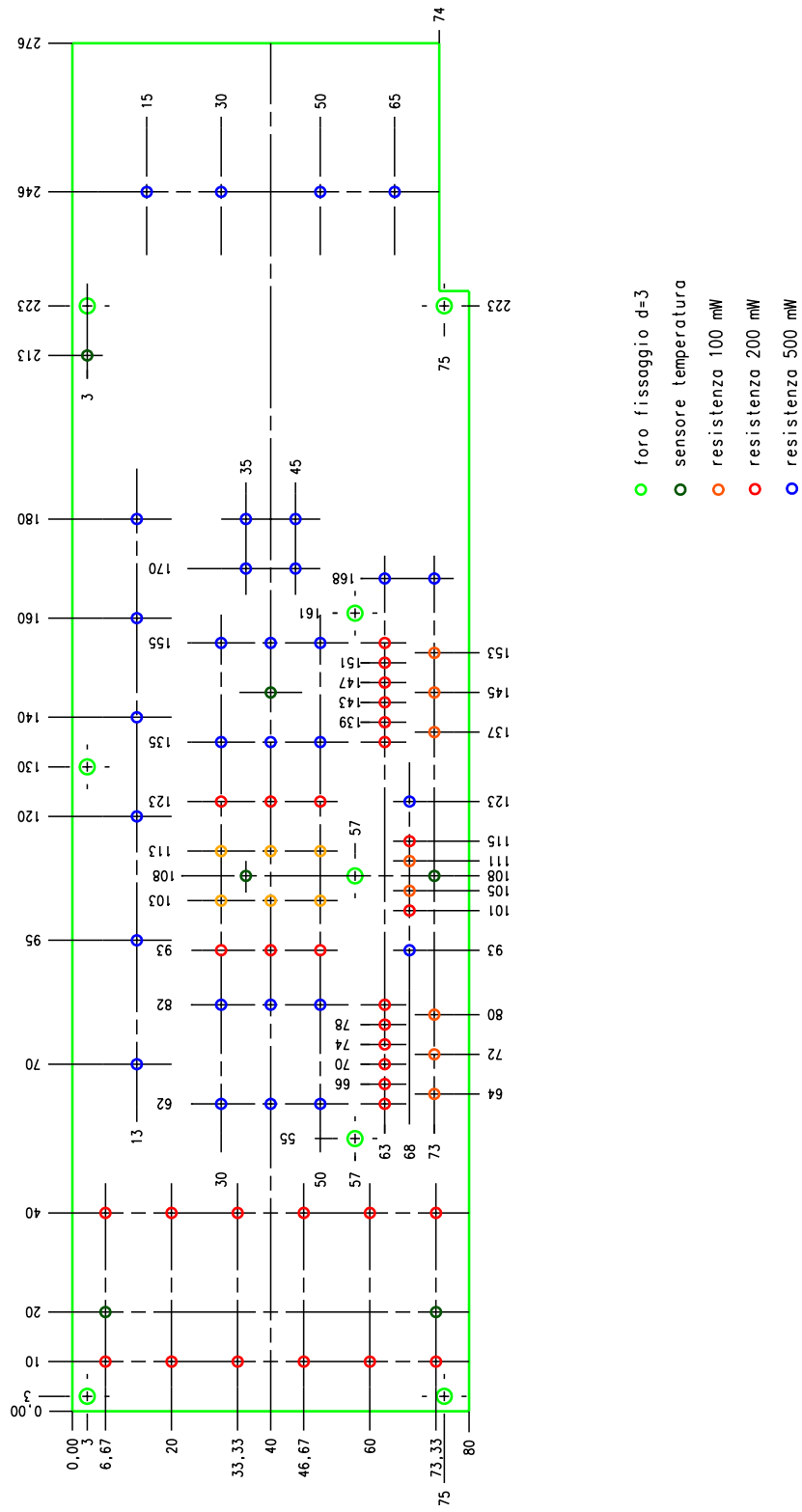


Figura 1.8: Disegno scheda di test



# Capitolo 2

## Strumenti di calcolo

### 1 Metodo agli elementi finiti

#### 1.1 Descrizione del metodo

Il metodo agli elementi finiti (FEM) si basa sui seguenti passaggi fondamentali:

- i. dividere l'intero dominio in parti più piccole, dette *celle*
- ii. su ciascun elementi descrivere le relazioni tra le variabili
- iii. assemblare gli elementi per ottenere le relazioni tra le variabili su tutto il dominio

La caratteristica principale è comunque la discretizzazione del dominio continuo di partenza in un dominio discreto (*mesh*) mediante l'uso di elementi di semplice forma (generalmente triangoli e quadrilateri per domini 2D, esaedri e tetraedri per domini 3D).

Questi elementi sono collegati tra loro da punti detti nodi (vertici degli elementi oppure punti interni) che possiedono uno o più gradi di libertà [5].

Si consideri, ad esempio, un operatore differenziale  $L$  ed una funzione  $\varphi(x, y, z)$  definita su un dominio  $V$ . Si supponga che

$$L[\varphi(x, y, z)] = g(x, y, z) \tag{2.1}$$

in cui

- $g(x, y, z)$  è una funzione assegnata
- la soluzione  $\varphi$  è soggetta alle condizioni sul contorno del dominio  $V$ .

Il metodo FEM prevede di passare dalla formulazione in forma differenziale (2.1) ad una in forma matriciale, approssimando il vero andamento della funzione incognita  $\varphi$  con quello di alcune funzioni particolari ad andamento noto (polinomiali, trigonometriche o esponenziali) dette *funzioni di forma*.

Si ha quindi una soluzione approssimata della (2.1) del tipo

$$\varphi_n(x, y, z) = \varphi_0(x, y, z) + \sum_{i=1}^n a_i \xi_i(x, y, z) \quad (2.2)$$

in cui:

- $\varphi_0(x, y, z)$  è una funzione incognita introdotta per soddisfare le condizioni al contorno
- $a_i$  sono coefficienti incogniti
- $\xi_i(x, y, z)$  sono le *funzioni di forma*

Generalmente i programmi di calcolo si occupano di stabilire autonomamente il grado della funzione di forma da utilizzare.

Per quanto ci si possa avvicinare alla soluzione, si tratta sempre di un metodo approssimato: ci sarà quindi una certa differenza tra la soluzione dell'equazione differenziale  $\varphi$  e quella approssimata  $\varphi_n$ . Tale differenza può essere espressa il *residuo*  $R_n(x, y, z)$  non ovunque nullo:

$$R_n(x, y, z) = L[\varphi_n(x, y, z)] - g(x, y, z) \quad (2.3)$$

Per rendere buona l'approssimazione si può imporre che il residuo abbia integrale nullo sul dominio  $V$ :

$$\int_V R_n dV = 0 \quad (2.4)$$

Ma la (2.4) non consente di determinare i valori dei coefficienti  $a_i$  della (2.2). Questi vengono determinati da  $n$  equazioni algebriche che impongono l'ortogonalità<sup>1</sup> tra il residuo  $R(x, y, z)$  ed  $n$  funzioni peso linearmente indipendenti  $W_i(x, y, z)$  opportunamente definite. Si ha quindi:

$$\int_V R(x, y, z) W_i(x, y, z) dV = 0 \quad (2.5)$$

---

<sup>1</sup>Impongono nullo il loro prodotto scalare

Se l'operatore  $L$  è lineare, le equazioni (2.5) danno luogo ad un sistema algebrico lineare di equazioni nelle incognite  $a_i$ .

La forma degli integrali (2.5) pone dei vincoli sulla regolarità delle funzioni di forma  $\xi_i$  e delle funzioni peso  $W_i$ ; in particolare, le funzioni devono essere tali da rendere gli integrali ben definiti e finiti.

L'arbitrarietà delle funzioni peso è limitata poi dalla necessità di pesare in modo equilibrato il residuo sul dominio evitando una eventuale compensazione dell'errore tra parti del dominio distanti tra loro.

Un caso particolare del metodo dei residui pesati è il cosiddetto *metodo di Galerkin*, nel quale si utilizzano le medesime funzioni come funzioni base e come funzioni peso; le equazioni per l'errore residuo diventano pertanto:

$$\int_V R(x, y, z) \xi_i(x, y, z) dV = 0 \quad (2.6)$$

I coefficienti  $a_i$  che si ottengono risolvendo il sistema (2.6) prendono il nome di coefficienti di Galerkin [5, 7].

Spesso i pacchetti software utilizzano come base una serie di funzioni semplici per ridurre il peso computazionale delle equazioni da risolvere. Il programma utilizzato per questa tesi utilizza come funzioni di forma-funzioni peso delle funzioni di classe  $C^{(0)}$ , in particolare dei polinomi di ordine piuttosto basso in modo da avere le loro derivate o integrali facilmente calcolabili [5, 7].

### Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno definiscono l'interfaccia tra i sottodomini del modello ed loro intorni. Insieme alle *condizioni iniziali* sono necessarie per una corretta definizione e risoluzione del modello.

Si distinguono:

- *condizione essenziale (o forzata)*
  - condizioni di Dirichlet, sulla funzione di ordine 0:  $\varphi = \varphi_0$
- *condizioni naturali*
  - condizioni di Neumann, o di flusso, sulla derivata prima:  $-\frac{\partial \varphi}{\partial n} = q_0$
  - condizioni di Robin, o miste, o convettive, imposte sulla combinazione lineare del valore della funzione e della sua derivata (condizione mista):  $-\frac{\partial \varphi}{\partial n} = \alpha \varphi + \beta$

Tutto il contorno è vincolato ad assumere valori essenziali o naturali. A seconda del tipo di equazione e delle condizioni al contorno, il problema può non avere soluzioni, una sola soluzione, più soluzioni o infinite soluzioni [8].

## 2 Software

Per la risoluzione delle simulazioni agli elementi finiti è necessario, a causa della elevata complessità computazionale, affidarsi alla potenza di calcolo di personal computer, ed in particolare di software per la risoluzione dei sistemi di equazioni parziali differenziali, che possono essere d'uso generale oppure specializzati.

I software hanno il compito di facilitare la compilazione e l'implementazione dei modelli, attraverso l'utilizzo di interfacce grafiche, e permettono la configurazione del sistema, la preparazione degli esperimenti e la loro successiva visualizzazione.

La componente principale di un software è il solver, che usa un tipo di formulazione ed un metodo d'integrazione ben definito. Il solver può compilare un file d'input scritto in un formato particolare, tipico del software in uso. Oltre al solver sono presenti anche dei programmi d'utilità pratica, in modo da agevolare l'utente nel costruire il file d'input senza la necessità di utilizzare un editor di testo. Tali programmi sono detti “*pre-processor*” e “*post-processor*” [5].

### 2.1 Pacchetto Comsol Multiphysics (© Comsol, Ab)

Tra i numerosi software commerciali che sfruttano il metodo degli elementi finiti, in questo lavoro di tesi è stato utilizzato COMSOL Multiphysics™. Si tratta di un pacchetto applicativo per modellare e simulare ogni tipo di processo fisico descrivibile tramite PDE.

Il punto di forza del programma, rispetto ad altri software, è la presenza di numerosi moduli corrispondenti a vari fenomeni fisici che possono essere combinati tra loro. Questi moduli contengono equazioni predefinite, tuttavia è possibile andare a modificare direttamente i coefficienti delle PDE contenute. È inoltre disponibile una libreria di modelli già compilati.

## Geometria

Il software dispone di un'interfaccia grafica interna, stile CAD, per la creazione di geometrie 1D, 2D e 3D; inoltre può importare geometrie create da strumenti di design esterni. Operatori booleani sono disponibili per la composizione delle geometrie.

Le geometrie 3D possono essere ricavate da quelle 2D per estrusione o rotazione attorno ad un asse di simmetria. Gli assi cartesiani e la griglia dell'interfaccia grafica possono essere modificati a piacimento, aumentando o diminuendo la spaziatura.

## Parametri ed equazioni

All'interno del software è presente uno strumento in cui è possibile specificare un parametro o una proprietà del materiale, inserendo valori costanti o espressioni scalari. Vengono accettati valori numerici, valori vettoriali e funzioni logiche e/o matematiche, e possono essere inseriti su tutto il dominio, sui sottodomini, sui contorni, sui punti o sugli spigoli della geometria.

## Condizioni al contorno

Nel programma si possono inserire condizioni su contorni interni ed esterni, sia di tipo Neumann che di tipo Dirichlet. Esattamente come per i parametri, è possibile inserire valori numerici o funzioni logiche e/o matematiche.

## Mesh

Il programma è in grado di creare mesh libere (free mesh), che possono essere usate su oggetti di qualsiasi geometria, in quanto si tratta di mesh che non hanno restrizioni in termine di distribuzione degli elementi. È inoltre possibile creare mesh mappate, estruse, ruotate, spaziate.

I lati degli elementi sono detti spigoli (edges) della mesh, mentre i loro angoli vertici della mesh; uno spigolo della mesh non contiene al suo interno vertici. In geometrie 1D il software suddivide i sottodomini (intervalli) in intervalli più piccoli (o elementi della mesh); i punti terminali sono detti vertici della mesh. In geometrie 2D i sottodomini sono divisi in elementi tipo triangoli o quadrilateri; se i contorni sono curvilinei, questi elementi rappresentano solo

un approssimazione della geometria originale.

In maniera analoga sono suddivisi i contorni della geometria. Se nella mesh sono presenti punti isolati, questi diventano automaticamente vertici della mesh.

In geometrie 3D gli elementi, in cui vengono suddivisi i sottodomini, sono tetraedri, esaedri o prismi, le cui facce, spigoli e vertici sono detti rispettivamente facce, spigoli e vertici della mesh.

I contorni sono suddivisi in triangoli o quadrilateri. Analogamente alle geometrie 2D, i punti isolati diventano vertici della mesh.

È possibile creare mesh 3D estraendo o ruotando una mesh 2D: in questo caso triangolari e quadrilateri diventano, rispettivamente, prismi ed esaedri.

Nel software si possono stabilire i seguenti parametri della mesh:

- dimensione massima degli elementi;
- fattore di scaling;
- velocità di crescita degli elementi;
- fattore di curvatura;
- risoluzione delle regioni ristrette;
- raffinamento.

## Solver

Di seguito le diverse tipologie di solver lineari presenti nel programma:

I solver UMFPACK, SPOOLES, PARDISO e Cholesky (TAUCS) sono migliori per modelli 1D e 2D, e per modelli 3D con pochi gradi di libertà. Per modelli con molti gradi di libertà sono necessari solver che richiedono molta memoria, ed in questi casi i più efficienti sono i risolutori iterativi, quali GMRES, gradienti coniugati e multi-griglia geometrica. Tuttavia solver di tipo iterativo sono meno stabili di quelli lineari e non sempre arrivano a convergenza (cioè arrivano ad una soluzione del problema); per migliorare la convergenza di un risolutore iterativo è possibile selezionare delle appropriate preconditioni. UMFPACK è il solver impostato di default.

Anche per quanto riguarda i solver è possibile modificare i parametri, al fine di ottenere un solver ottimale per il modello simulato.

<b>Tipologia</b>	<b>Utilizzo</b>
UMFPACK	diretto per problemi non simmetrici
SPOOLES	diretto per problemi simmetrici e non-simmetrici; utilizza meno memoria rispetto a UMFPACK
PARDISO	diretto per problemi non simmetrici; utilizza spesso meno memoria rispetto a UMFPACK.
Cholesky (TACUS)	diretto per problemi simmetrici e positivi
GMRES	iterativo per problemi non-simmetrici
Gradienti coniugati	iterativo per problemi simmetrici e positivi
Multi-griglia geometrica	iterativo per problemi ellittici o parabolici

Tabella 2.1: Solver lineari presenti in COMSOL©

### Convergenza ed errori

Il metodo agli elementi finiti non è un metodo esatto ma approssimato, ad eccezione di alcuni casi rari. La convergenza dell'approssimazione con la soluzione esatta dipende da numerosi parametri. Se il modello è impostato correttamente si è comunque nell'ambito di approssimazioni molto vicine alla soluzione esatta.

La precisione dell'approssimazione dipende sia dal grado di polinomio utilizzato come funzione di forma sia dalla dimensione dell'intervallo di suddivisione degli elementi finiti: a parità di grado del polinomio si avrà che l'errore si riduce avvicinando i nodi, ovvero diminuendo la dimensione degli elementi. Alcune tra le tipiche cause di errore riguardano (escludendo malfunzionamenti dovuti al pc):

- errori nel codice di calcolo;
- errori dovuti in pre-processor e post-processor;
- approssimazioni numeriche;
- individuazione del problema fisico non corretta;
- uso di elementi finiti non adatti al problema reale.

È quindi necessario un controllo sul risultato ottenuto, effettuando ad esempio una verifica dell'ordine di grandezza dei risultati attesi, oppure dei test

di prova con verifica di soluzioni note.

Un'altra possibilità di controllo sul risultato ottenuto si ha rendendo la mesh più fitta sul dominio, ovvero diminuendo la dimensione degli elementi della mesh, in maniera tale da avvicinarsi alla situazione reale. È quindi possibile confrontare la convergenza dei valori ottenuti per ciascuna delle mesh utilizzate e rendersi conto di eventuali errori del modello.

## 3 Trasmissione del calore e sua modellazione

### 3.1 Caratteristiche di scambio

Lo scambio termico è definito come movimento di energia dovuto ad una differenza di temperatura. Esso è caratterizzato dai seguenti tre meccanismi:

- **CONDUZIONE:** scambio termico per diffusione in un mezzo stazionario su cui è presente un gradiente di temperatura.
- **CONVEZIONE:** il calore è trasportato attraverso il moto di un fluido
- **IRRAGGIAMENTO:** scambio termico, a mezzo di onde elettromagnetiche, tra due superfici ( $A$  e  $B$ ) a differenti temperature  $T_A$  e  $T_B$ .

Nel modello si è considerata solo la *conduzione*, ritenendo gli altri due meccanismi assenti. Infatti:

- *convezione*: per quanto riguarda le prove in aria, essa può essere considerata trascurabile; la disposizione orizzontale delle schede non favorisce infatti questo tipo di scambio. Per quanto riguarda le prove nel vuoto, corrispondenti poi all'effettivo utilizzo dell'apparato, questo tipo di scambio è completamente assente in quanto manca il mezzo fluido.
- *irraggiamento*: può essere considerato trascurabile in quanto le schede sono affacciate una all'altra ed in regime stazionario sono tutte alla stessa temperatura. Fanno eccezione le due superfici più esterne (lato circuito della scheda più alta e la mensola più bassa) che si affacciano all'ambiente, ma il contributo è trascurabile ed ai fini della modellazione porterebbe ad un'inutile appesantimento dei calcoli.

Va poi osservato che quando tutti i moduli saranno collocati nella struttura definitiva, anche le superfici esterne del blocco di schede saranno esposte ad altre superfici alla medesima temperatura.

### 3.2 Conduzione

Lo scambio termico per conduzione è governato dalla seguente equazione:

$$\delta_{ts}\rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} - k\nabla^2 T = Q \quad (2.7)$$

in cui:

$\delta_{ts}$  è il *coefficiente di scala temporale*; normalmente vale 1 ma per passare, per esempio, da secondi a minuti, lo si pone pari a 1/60;

$\rho$  è la *densità* del materiale;

$C_P$  è la *capacità termica*: descrive la quantità di energia necessaria per generare un incremento unitario di temperatura in una unità di massa;

$k$  è la *conducibilità termica*: descrive la relazione tra il vettore di flusso del calore  $\mathbf{q}$  ed il gradiente di temperatura  $\nabla T$  come:

$$\mathbf{q} = -k\nabla T \quad (2.8)$$

che è la Legge di Fourier per la conduzione;

$Q$  è la *sorgente termica*: descrive la generazione di calore all'interno del dominio. Esprime riscaldamento o raffreddamento con valori positivo o negativo, rispettivamente.

## 4 Condizioni al contorno adottate nei modelli a seguire

In tutti i modelli sono state utilizzate le seguenti condizioni al contorno:

- *temperatura assegnata*: si impone una temperatura o una distribuzione di temperatura su di un contorno;
- *Strato sottile termicamente resistivo*: viene imposto ad una coppia di superfici (1 e 2) per caratterizzarne il contatto.

Indicando con  $k$  e con  $d$  la conducibilità termica e lo spessore dello strato termicamente resistivo, rispettivamente, la condizione è esprimibile come:

$$\begin{cases} \mathbf{n}_1(k_1\nabla T_1) = \frac{k}{d}(T_2 - T_1) \\ \mathbf{n}_2(k_2\nabla T_2) = \frac{k}{d}(T_1 - T_2) \end{cases} \quad (2.9)$$

- *Isolamento termico*: viene assegnata ai contorni su cui lo scambio termico è trascurabile. È esprimibile come:

$$\mathbf{n}(k\nabla T) = 0 \quad (2.10)$$

La (2.10) impone nullo il gradiente della temperatura su tutto il contorno. Affinché ciò sia vero, la temperatura da un lato di esso deve essere uguale a quella dell'altro lato. Non essendoci una differenza di temperatura, il calore non può passare attraverso il contorno.

# Capitolo 3

## Considerazioni preliminari

Di seguito sono esposte le semplificazioni seguite per quel che concerne il calcolo della conducibilità termica della PCB, la modellazione del contatto tra resistenze e PCB e la modellazione del contatto tra mensola in alluminio e piastra di rame.

Questo lo si ottiene simulando modelli successivi, inserendo valori di conducibilità termica di tentativo, fino all'ottenimento del campo di temperatura misurato.

### 1 Conducibilità termica PCB

Come risulta dalla sezione in Figura 3.1, sono presenti strati alternati di vetronite e rame, nonché dei ponti in rame tra alcuni strati. Tuttavia, nel modello simulato, si è considerato il materiale della scheda come isotropo, la cui conducibilità termica  $k_{PCB}$  risulta da determinare.

Per quanto riguarda la parte superiore della scheda, si hanno a disposizione due tipi di dati:

- immagine da termocamera riferita ai test in aria (Figura B.3)
- mappa di temperature (Figure B.7 e B.8), fornita da sensori posizionati sulla scheda, riferita ai test in vuoto

Risultano così note la temperatura di una resistenza da 500 mW, posta nella zona centrale della scheda, e la temperatura della PCB nell'intorno della resistenza stessa.

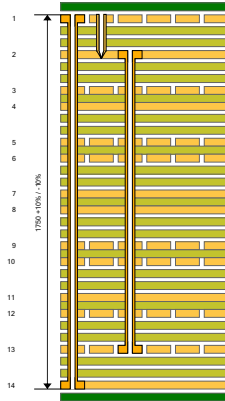


Figura 3.1: Stratigrafia della PCB

Si è quindi modellata una resistenza da 500 mW disposta al centro di una porzione di PCB.

## 1.1 Modello di una singola resistenza

### Proprietà dei sottodomini

Il modello della singola resistenza prevede dei sottodomini per i quali si ritiene trascurabile l'effetto convettivo. Nella Figura 3.2 sono evidenziati i sottodomini considerati. In relazione a questa semplificazione di modello, si pone l'ipotesi di considerare la resistenza come un elemento in allumina con generazione di potenza termica assegnata in  $\text{W}/\text{m}^3$  [12]. Come detto in precedenza,

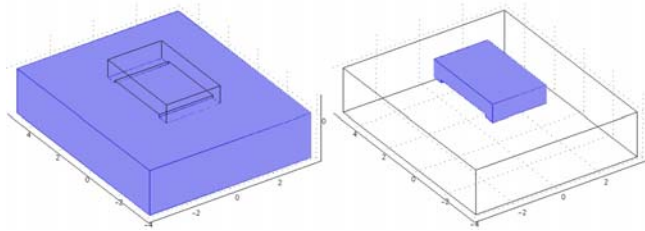


Figura 3.2: Sottodomini del modello. In ordine da sinistra: PCB e resistenza da 500 mW

questo modello ha la funzione di determinare la conducibilità termica  $k_{PCB}$  della scheda.

### Condizioni al contorno

Ai bordi indicati in Figura 3.3 è stata assegnata la temperatura di  $58.6^{\circ}\text{C}$  rilevata sperimentalmente. Alle altre superfici di confine è stata assegnata la condizione di isolamento termico, mentre alle superfici di contatto tra i sottodomini è stata assegnata la continuità.

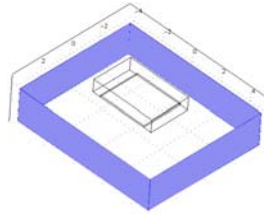


Figura 3.3: Bordi con temperatura assegnata

### Risultati

Adottando un primo valore di  $k_{PCB}$  consigliato dal programma, si è ottenuto un campo di temperatura (Figura 3.4) non compatibile con i dati sperimentali in nostro possesso.

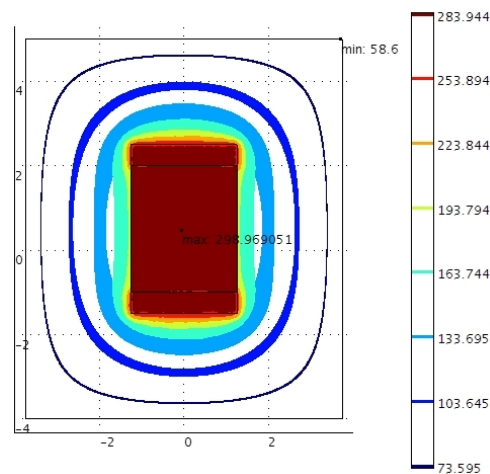


Figura 3.4: Temperature con  $k_{PCB} = 0.3 \text{ W/mK}$

Per tentativi successivi si è arrivati, dopo un certo numero di iterazioni, a determinare un valore di  $k_{PCB}$  che fornisce un risultato (Figura 3.5) com-

patibile con il campo termico sperimentalmente determinato. Tale valore,  $k_{PCB} = 13.5 \text{ W/mK}$ , verrà utilizzato per la simulazione della scheda finale.

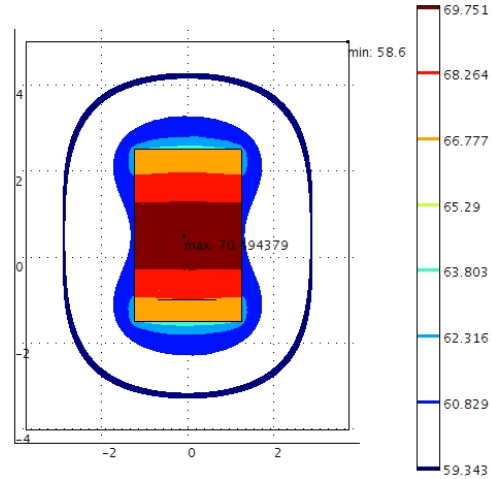


Figura 3.5: Temperature con  $k_{PCB} = 13.5 \text{ W/mK}$

## 2 Semplificazione geometrica della resistenza

La geometria della resistenza, così come utilizzata nel modello precedente, risulta troppo complessa per essere estesa al modello della scheda completa, sulla quale ne sono fissate più di settanta.

Si è così deciso di modellare la resistenza come un parallelepipedo pieno completamente aderente alla PCB.

### 2.1 Modello di una singola resistenza

#### Proprietà dei sottodomini, condizioni al contorno e risultati

Mantenendo le stesse condizioni al contorno del modello simulato in aria (1.1), ma con geometria della resistenza semplificata a parallelepipedo, si nota come la semplificazione così adottata sia abbastanza imprecisa (Figura 3.6).

Per migliorare detta situazione si dovrà introdurre uno strato fittizio termicamente resistivo tra i due componenti, come indicato in Figura 3.7.

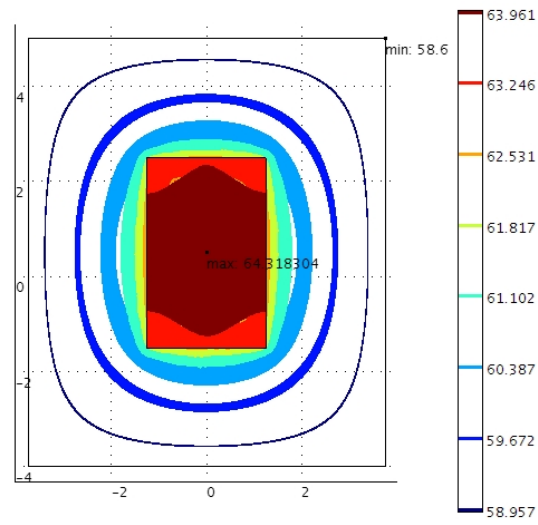


Figura 3.6: Campo di temperatura. Resistenza piena completamente aderente alla PCB

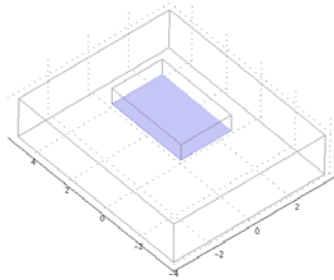


Figura 3.7: strato fittizio termicamente resistivo

Similmente a quanto fatto prima si è variata la conducibilità termica dello strato fino al raggiungimento del campo termico misurato. Si è trovato infine un valore  $k_{R-PCB} = 0.83 \text{ W/mK}$  (Figura 3.8).

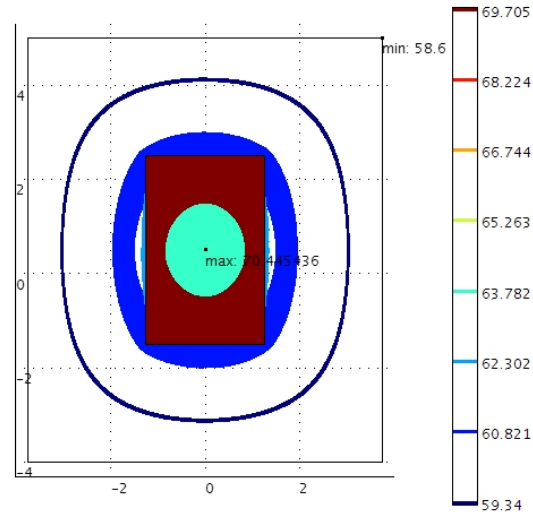


Figura 3.8: Campo di temperatura. Resistenza piena completamente aderente alla PCB con strato termicamente resistivo tra i due componenti

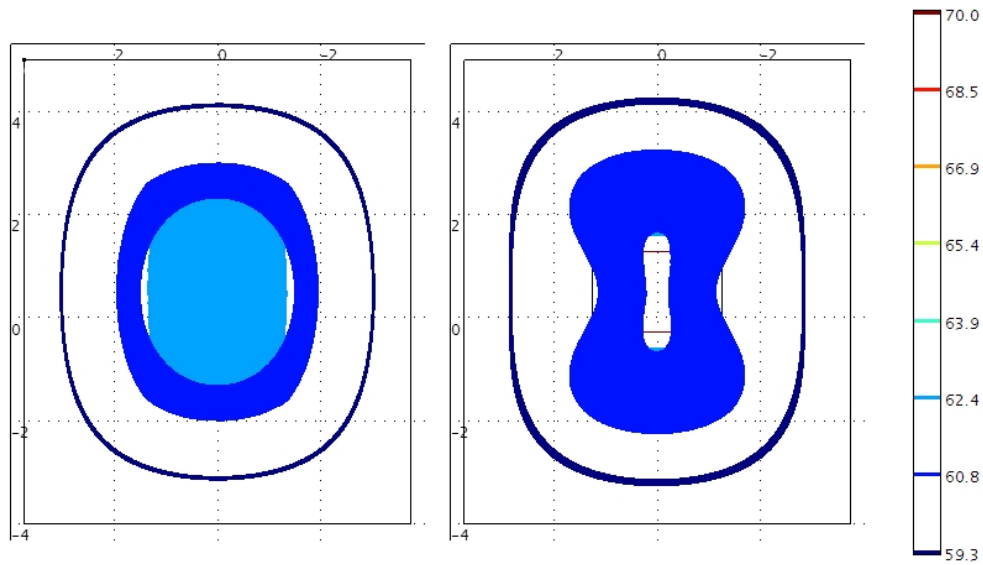


Figura 3.9: Isosuperfici di temperatura a confronto. A sinistra, resistenza semplificata; a destra, resistenza non semplificata

### 3 Contatto mensola-piastra raffreddante

Lo studio termico dell'insieme della mensola e della piastra raffreddante prevede la semplificazione della piastra raffreddante stessa considerata come elemento continuo pieno. In essa, infatti, sono presenti dei canali realizzati

di macchina entro i quali scorre acqua in condizioni di flusso parallelo. La simulazione di detto sistema sarebbe complessa, pertanto si ricorre alla citata semplificazione.

Di seguito viene descritto come è stato modellato tale contatto avendo a disposizione le temperature sul lato esterno della piastra di rame e le temperature sulla mensola ad essa collegata.

### 3.1 Modello semplificato

#### Proprietà dei sottodomini, condizioni al contorno e risultati preliminari

Si è considerata la porzione di piastra in rame, con annessa porzione di mensola in duralluminio, nella posizione in cui si conoscono tutte le temperature di interesse:

$T_P$  temperatura della piastra nel bordo esterno

$T_{F6-m}$  temperatura nella mensola a circa 10 mm dal contatto piastra-mensola

$T_{F7-m}$  temperatura nella mensola a circa 10 mm dal bordo esterno

In Figura 3.10, sono rappresentati i sottodomini del modello.

Alla mensola è stata poi assegnata una generazione di potenza interna pari

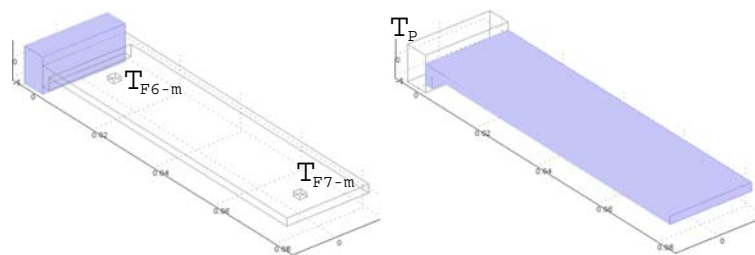


Figura 3.10: sottodomini del modello. A sinistra la porzione di piastra, a destra la porzione di mensola

alla potenza termica della scheda relativa al tratto considerato.

Le condizioni al contorno sono tutte di isolamento termico, tranne per la superficie esterna della piastra di rame alla quale è stata imposta la temperatura  $T_P$  misurata sperimentalmente.

In questa fase preliminare il contatto è stato considerato continuo.

Imponendo  $T_P = 33.5^\circ\text{C}$  alla parete, nei punti corrispondenti al sensore F6 si misura una temperatura simulata  $T_{F6-s} = 35.9^\circ\text{C}$ . La temperatura misurata però risulta  $T_{F6-m} = 39.7^\circ\text{C}$ .

Il risultato (mostrato a sinistra in Figura 3.11) suggerisce di imporre anche per questo contatto uno strato fittizio termicamente resistivo.

### Intervento sul contorno e risultati

Anche in questo caso si procede per tentativi fissando lo spessore dello strato termicamente resistivo a 0.1 mm e variando la conducibilità termica  $k_{M-P}$  fino a raggiungere una temperatura accettabile nei punti di riferimento.

Si è trovato  $k_{M-P} = 0.5$  che fornisce risultati tali da ritenere accettabile la semplificazione.

In Figura 3.11 sono messi a confronto i due modelli.

In Tabella 3.1 sono riportati i risultati numerici del modello per ogni por-

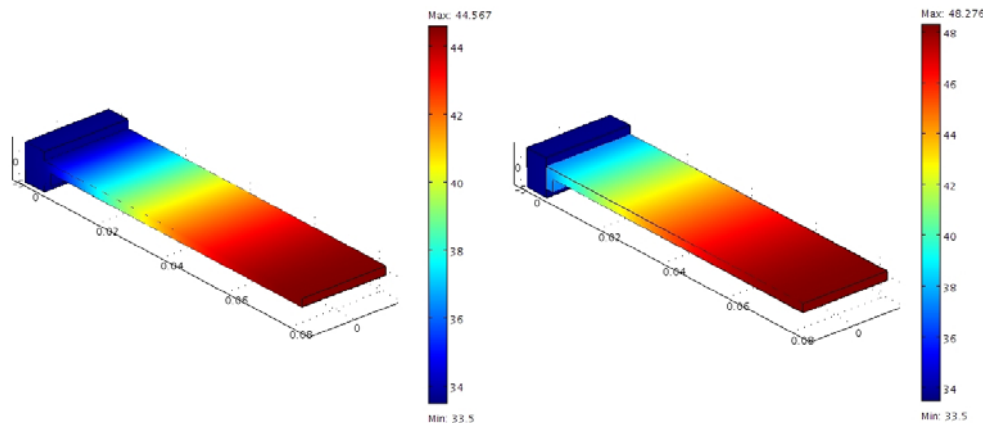


Figura 3.11: Modelli a confronto: a destra con strato termicamente resistivo, a sinistra senza

tata di test con relativi errori. In Figura 3.12, per maggior chiarezza, sono riportati i grafici relativi ai valori della Tabella 3.1 Si nota che l'errore su F6 risulta sempre minore del 2% mentre quello su F7 arriva fino all'11%. Valori accettabili in quanto si è imposta inizialmente la semplificazione di definire una potenza uniforme sul tratto di mensola considerato, situazione che nella realtà non risulta esatta.

$Q$ l/min	$T_P$ °C	$T_{F6-m}$ °C	$T_{F6-s}$ °C	$E_{F6}$ %	$T_{F7-m}$ °C	$T_{F7-s}$ °C	$E_{F7}$ %
0.4	33.5	39.7	39.8	0.25	45.9	48.1	4.79
0.6	28.2	34	34.4	1.18	39.6	42.7	7.83
0.8	24.5	30.4	30.6	0.66	35.9	39.1	8.91
1.0	22.3	28	28.4	1.43	33.4	36.9	10.48
1.2	20.6	26.2	26.7	1.91	31.7	35.2	11.04

Tabella 3.1: Risultati numerici

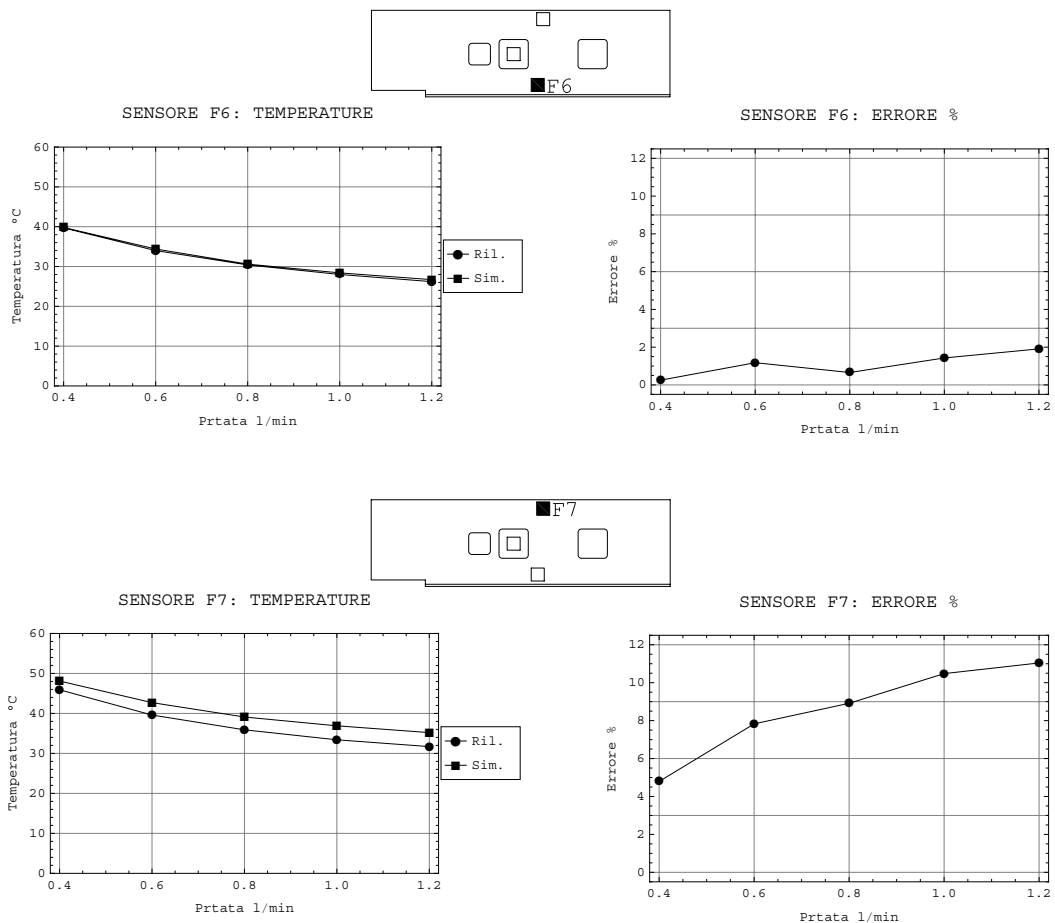


Figura 3.12: Confronti temperature rilevate (Ril) con quelle simulate (Sim) e relativo errore percentuale



# Capitolo 4

## Validazione del modello FEM sulla scheda di test

In questo capitolo si effettuerà la simulazione della scheda finale di test e la si confronterà con i dati ottenuti sperimentalmente. I dati in input nelle simulazioni sono quelli ottenuti dalle simulazioni precedenti e dai test eseguiti presso l'INFN di Napoli.

### 1 Sottodomini e loro proprietà

È stato realizzato un disegno in tre dimensioni della scheda seguendo le indicazioni indicate in Figura 1.8.

La geometria comprende una porzione di piastra di rame a cui è collegata la mensola con sopra la scheda di test. Le resistenze sono poi state modellate come parallelepipedi con generazione interna di calore.

Di seguito l'elenco dei sottodomini con le relative caratteristiche:

- *Resistenza da 100 mW:*

MATERIALE: allumina; si assume una conducibilità termica  $k_R = 27$  W/mK

GENERAZIONE INTERNA<sup>1</sup>:  $Q_{100} = 3.33 \cdot 10^7$  W/m<sup>3</sup>

- *Resistenza da 200 mW:*

GENERAZIONE INTERNA:  $Q_{200} = 4.17 \cdot 10^7$  W/m<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup>Valori ottenuti dai mW dissipati dalla resistenza divisi per il volume, in metri cubi, dell'elemento che la rappresenta

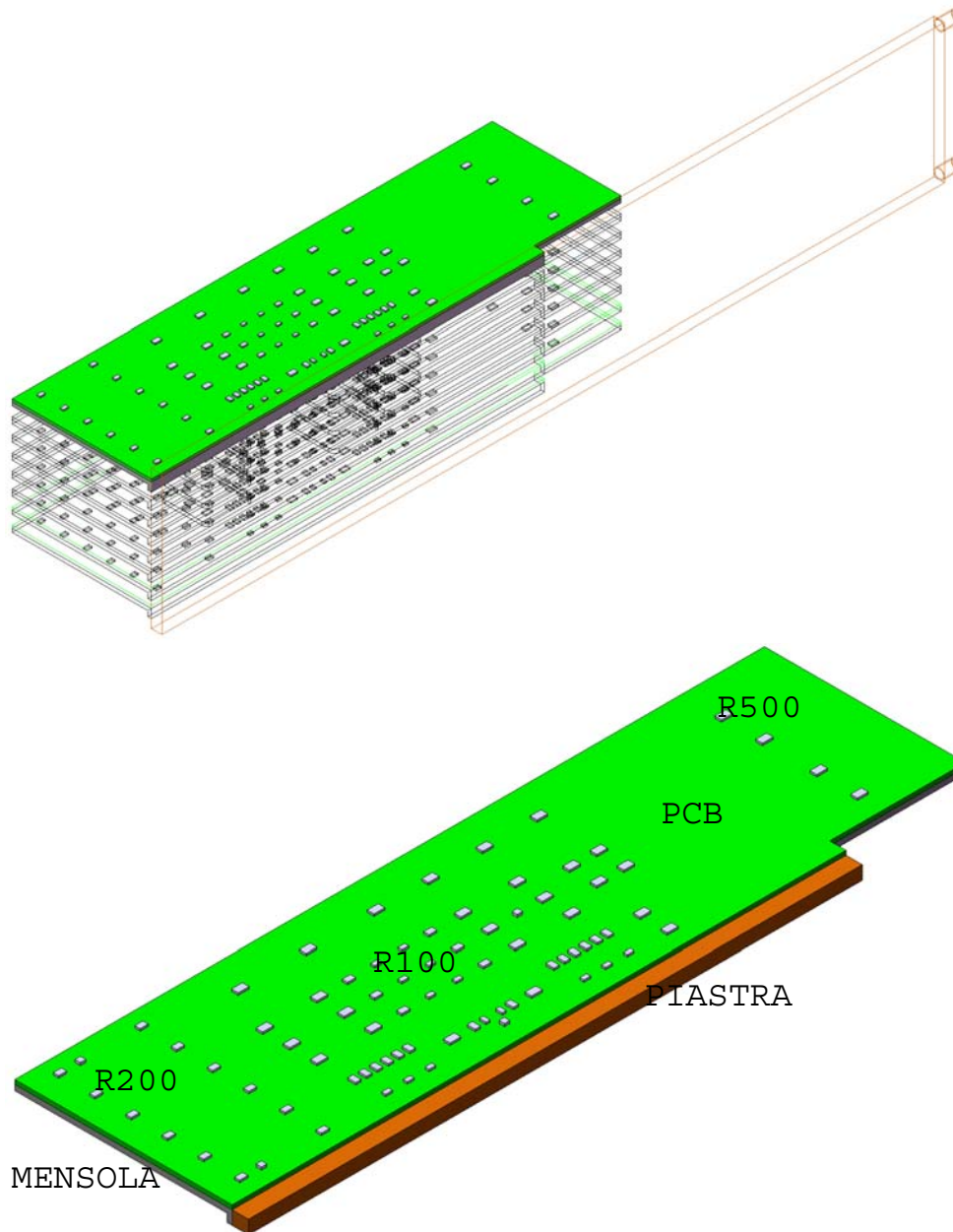


Figura 4.1: Sopra: assieme completo. Sotto: porzione considerata nel modello

– Resistenza da 500 mW:

$$\text{GENERAZIONE INTERNA: } Q_{500} = 6.25 \cdot 10^7 \text{ W/m}^3$$

– PCB:

MATERIALE: semplificato a materiale isotropo secondo le considerazioni del Capitolo 3. Viene assegnata una conducibilità termica  $k_{PCB} =$

13.5 W/mK

– *Mensola:*

MATERIALE: duralluminio; si assume una conducibilità termica  $k_M = 160$  W/mK

– *Piastra:*

MATERIALE: rame; si assume una conducibilità termica  $k_M = 400$  W/mK

## 2 Condizioni al contorno

Di seguito le proprietà dei contorni ai quali non è stato attribuito l'isolamento termico.

– *Contatto resistenza-PCB:*

CONDIZIONE: si è attribuito un layer fittizio termicamente resistivo di spessore  $s = 1 * 10^{-4}$  m e conducibilità termica  $k_{R-PCB} = 0.83$  W/mK (fisso per le diverse portate).

– *Contatto PCB-mensola:* nelle prove sperimentali in vuoto, tra le due parti è stato applicato uno strato di composto termo-conduttivo non siliconico ELECTROLUBE HTC avente conducibilità termica nota.

CONDIZIONE: si è attribuito un layer fittizio termicamente resistivo di spessore  $s = 1 * 10^{-4}$  m e conducibilità termica  $k_{PCB-M} = 0.9$  W/mK<sup>2</sup> (fisso per le diverse portate).

– *Contatto mensola-piastra:*

CONDIZIONE: si è attribuito un layer fittizio termicamente resistivo di spessore  $s = 1 * 10^{-4}$  m e conducibilità termica  $k_{R-PCB} = 0.5$  W/mK (fisso per le diverse portate).

– *Superficie esterna della piastra di rame:*

CONDIZIONE: a seconda della portata di fluido refrigerante presa in considerazione, si è attribuita una distribuzione parabolica di temperatura data dall'interpolazione dei valori misurati sperimentalmente. Per le distribuzioni si fa riferimento all'Appendice C.

---

<sup>2</sup>Dato fornito dal produttore

### 3 Risultati

I risultati dell'analisi stazionaria sono riportati nei grafici seguenti al variare della portata del fluido di refrigerazione. I valori sono espressi in gradi Celsius e la superficie rappresentata è quella superiore della scheda.

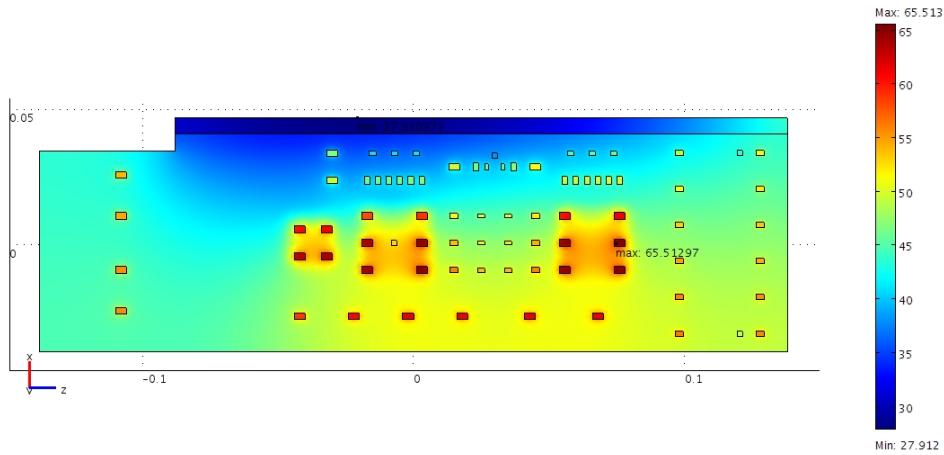


Figura 4.2: Temperature a 0.4 l/min

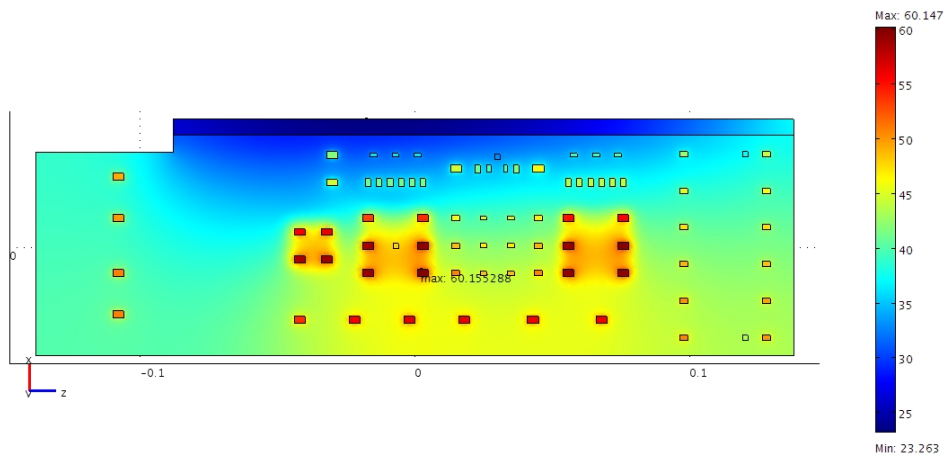


Figura 4.3: Temperature a 0.6 l/min

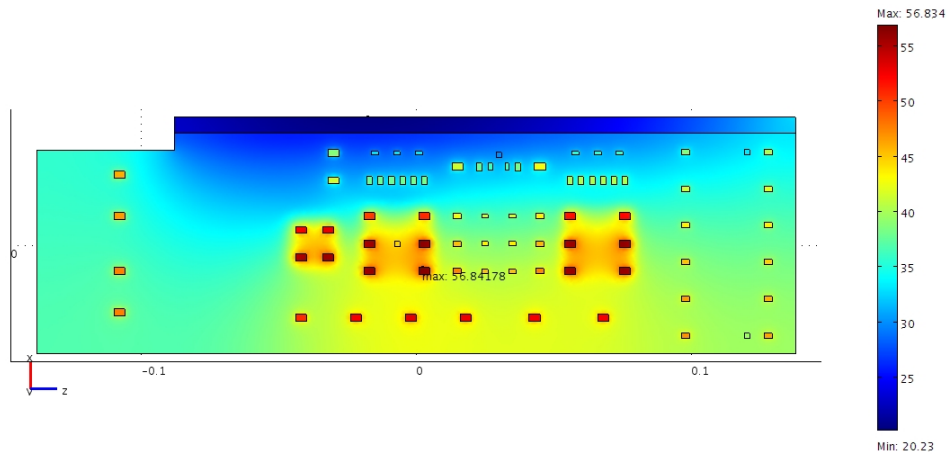


Figura 4.4: Temperature a 0.8 l/min

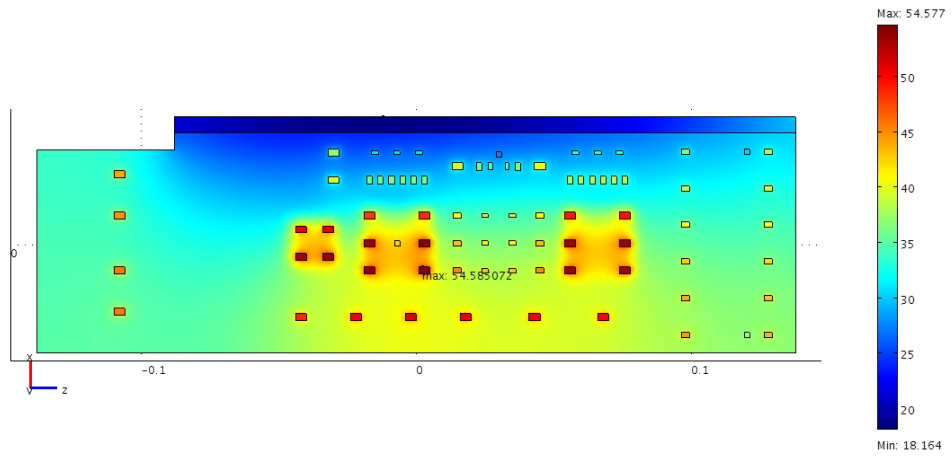


Figura 4.5: Temperature a 1.0 l/min

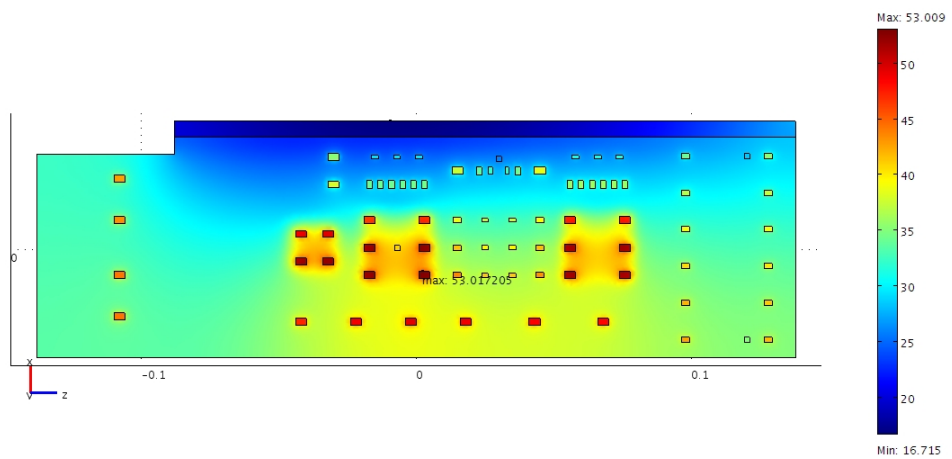


Figura 4.6: Temperature a 1.2 l/min

### 3.1 Analisi dei risultati

In Tabella 4.1 sono riportati i valori numerici delle temperature rilevate e degli errori su ogni sensore al variare della portata del liquido di raffreddamento.

Si indicano con:  $T_S$  le temperature misurate nella simulazione in quattro punti vicini alla posizione del sensore;  $T_{Sm}$  la media delle temperature  $T_S$ ;  $T_M$  la temperatura rilevata sperimentalmente;  $E_{rel}$  l'errore relativo;  $E_{ass}$  l'errore assoluto percentuale riferito alla rispettiva  $T_M$ .

I dati, per una più rapida valutazione, sono stati riportati anche su grafici. Nel grafico in Figura 4.7 sono poi riportati i valori delle temperature massime raggiunte nel modello al variare della portata di raffreddamento.

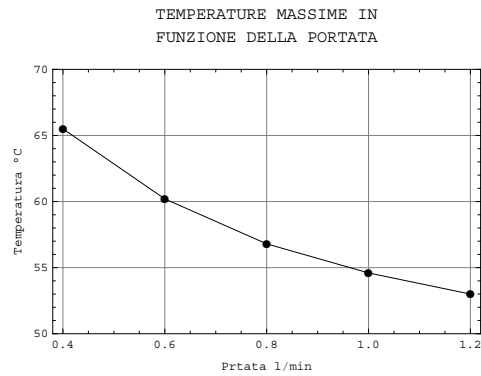


Figura 4.7: Temperature massime nei modelli simulati

$Q = 0.4 \text{ l/min}; T_{in} = 8 \text{ }^\circ\text{C}; T_{out} = 13.5 \text{ }^\circ\text{C}$								
	$T_S \text{ [}^\circ\text{C]}$				$T_{Sm} \text{ [}^\circ\text{C]}$	$T_M \text{ [}^\circ\text{C]}$	$E_{rel} \text{ [}^\circ\text{C]}$	$E_{ass} \text{ \%}$
S1	49.12	49.15	49.15	49.15	49.1425	53.63636364	-4.493863636	-8.378389831
S2	43.38	43.34	43.4	43.44	43.39	43.48051948	-0.090519481	-0.20818399
S4	38.07	38.09	38.28	38.53	38.2425	50.1038961	-11.8613961	-23.67360031
S5	52.58	52.71	52.89	52.86	52.76	55.01298701	-2.252987013	-4.095372993
F6	38.93	39.31	38.91	38.91	39.015	39.66233766	-0.647337662	-1.632121807
F7	50.64	50.61	50.62	50.61	50.62	45.09090909	5.529090909	12.26209677
F8	52.74	53.08	52.62	52.57	52.7525	53.53246753	-0.779967532	-1.45699903
$Q = 0.6 \text{ l/min}; T_{in} = 9.5 \text{ }^\circ\text{C}; T_{out} = 13.9 \text{ }^\circ\text{C}$								
	$T_S \text{ [}^\circ\text{C]}$				$T_{Sm} \text{ [}^\circ\text{C]}$	$T_M \text{ [}^\circ\text{C]}$	$E_{rel} \text{ [}^\circ\text{C]}$	$E_{ass} \text{ \%}$
S1	43.37	43.37	43.38	43.37	43.3725	47.76623377	-4.393733766	-9.198409462
S2	37.2	37.24	37.31	37.27	37.255	37.32467532	-0.069675325	-0.186673626
S4	32.94	32.96	33.49	33.14	33.1325	44.62337662	-11.49087662	-25.75080035
S5	47.77	47.63	47.94	47.92	47.815	49.92207792	-2.107077922	-4.220733611
F6	33.9	33.89	34.17	33.92	33.97	34.02597403	-0.055974026	-0.164503817
F7	45.42	45.45	45.42	45.42	45.4275	39.58441558	5.843084416	14.76107283
F8	47.63	47.79	47.84	47.5	47.69	48.46753247	-0.777532468	-1.604233655
$Q = 0.8 \text{ l/min}; T_{in} = 7.5 \text{ }^\circ\text{C}; T_{out} = 11.5 \text{ }^\circ\text{C}$								
	$T_S \text{ [}^\circ\text{C]}$				$T_{Sm} \text{ [}^\circ\text{C]}$	$T_M \text{ [}^\circ\text{C]}$	$E_{rel} \text{ [}^\circ\text{C]}$	$E_{ass} \text{ \%}$
S1	39.61	39.62	39.62	39.61	39.615	43.8961039	-4.281103896	-9.752810651
S2	33.17	33.21	33.43	33.24	33.2625	33.4025974	-0.140097403	-0.419420684
S4	29.68	29.7	29.89	29.88	29.7875	41.06493506	-11.27743506	-27.46244466
S5	44.68	44.66	44.38	44.52	44.56	46.64935065	-2.089350649	-4.478841871
F6	30.31	30.7	30.71	30.69	30.6025	30.38961039	0.21288961	0.700534188
F7	42.03	42.03	42.03	42.03	42.03	35.8961039	6.133896104	17.08791606
F8	44.37	44.54	44.87	44.25	44.5075	44.90909091	-0.401590909	-0.894230769
$Q = 1.0 \text{ l/min}; T_{in} = 7.5 \text{ }^\circ\text{C}; T_{out} = 9.9 \text{ }^\circ\text{C}$								
	$T_S \text{ [}^\circ\text{C]}$				$T_{Sm} \text{ [}^\circ\text{C]}$	$T_M \text{ [}^\circ\text{C]}$	$E_{rel} \text{ [}^\circ\text{C]}$	$E_{ass} \text{ \%}$
S1	36.95	36.94	36.94	36.95	36.945	41.61038961	-4.66538961	-11.21207865
S2	30.32	30.36	30.39	30.58	30.4125	30.62337662	-0.210876623	-0.688613232
S4	27.03	27.34	27.85	27.8	27.505	38.84415584	-11.33915584	-29.19140756
S5	42.34	42.36	42.5	42.48	42.42	44.41558442	-1.995584416	-4.492982456
F6	28.41	28.41	28.69	28.45	28.49	28.02597403	0.464025974	1.655699722
F7	39.68	39.68	39.68	39.68	39.68	33.42857143	6.251428571	18.7008547
F8	42.19	42.35	42.4	42.23	42.2925	42.51948052	-0.226980519	-0.533827123
$Q = 1.2 \text{ l/min}; T_{in} = 7.5 \text{ }^\circ\text{C}; T_{out} = 9.1 \text{ }^\circ\text{C}$								
	$T_S \text{ [}^\circ\text{C]}$				$T_{Sm} \text{ [}^\circ\text{C]}$	$T_M \text{ [}^\circ\text{C]}$	$E_{rel} \text{ [}^\circ\text{C]}$	$E_{ass} \text{ \%}$
S1	35.1	35.08	35.11	35.11	35.1	40.07792208	-4.977922078	-12.4206092
S2	28.36	28.39	28.46	28.49	28.425	28.98701299	-0.562012987	-1.938844086
S4	25.72	25.73	26.24	25.91	25.9	37.35064935	-11.45064935	-30.65716273
S5	40.82	40.66	40.97	40.96	40.8525	42.96103896	-2.108538961	-4.908025998
F6	26.56	26.87	26.86	26.48	26.6925	26.23376623	0.458733766	1.748638614
F7	38.06	38.06	38.06	38.06	38.06	31.66233766	6.397662338	20.20590648
F8	40.39	40.71	40.87	40.83	40.7	40.85714286	-0.157142857	-0.384615385

Tabella 4.1: Temperature a confronto

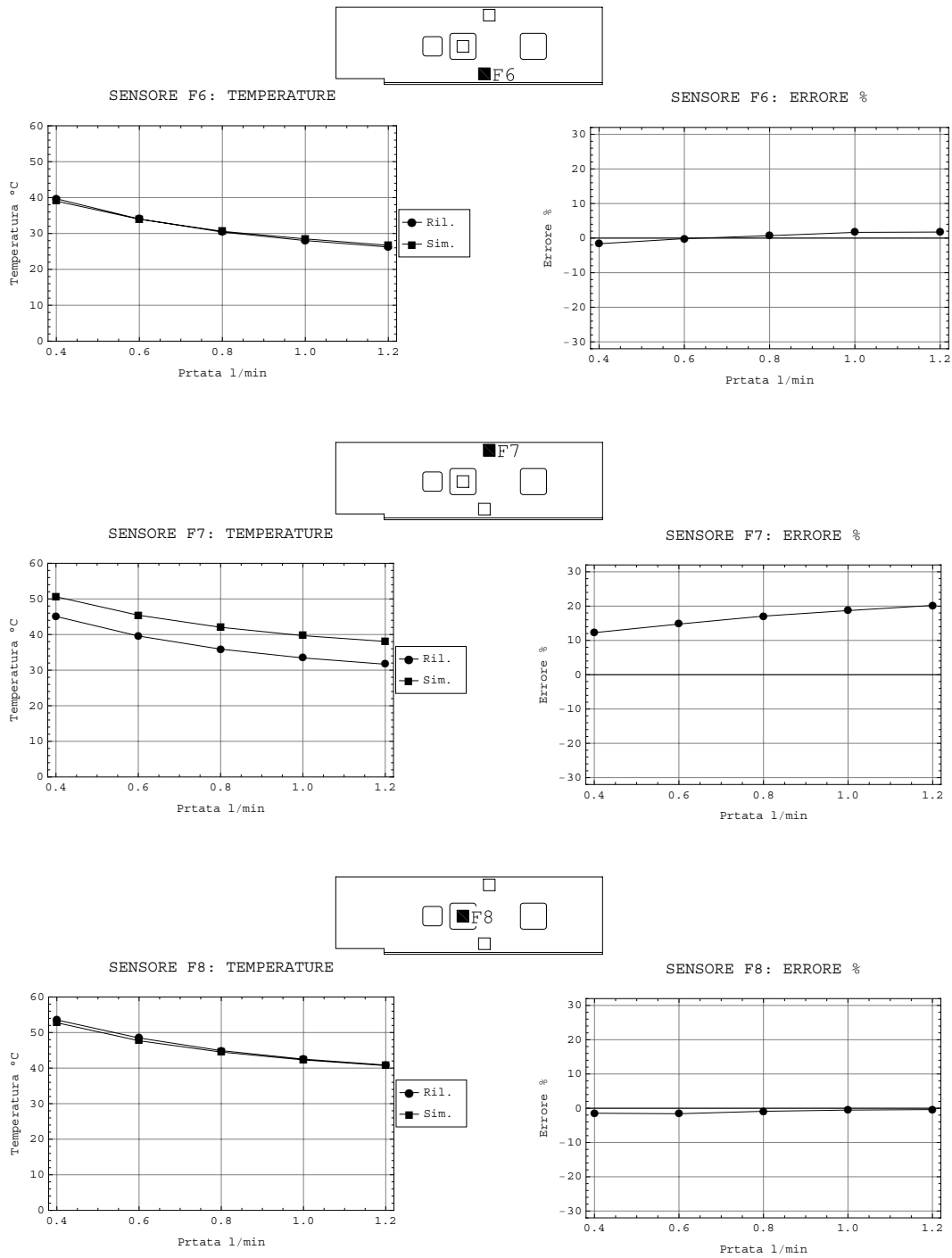


Figura 4.8: Confronti temperature rilevate (Ril) con temperature simulate (Sim) e relativo errore percentuale (sensori F6, F7, F8)

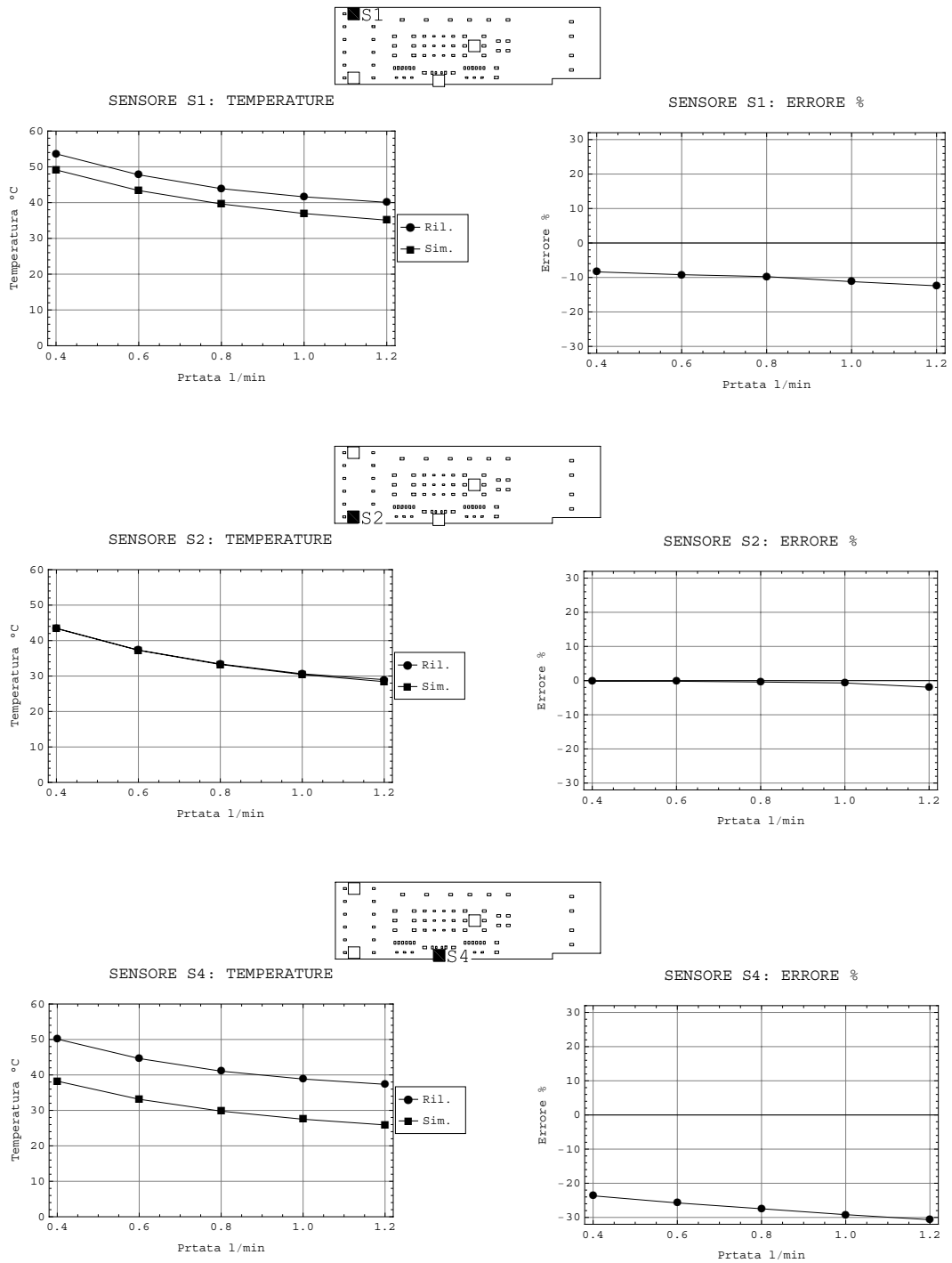


Figura 4.9: Confronti temperature rilevate (Ril) con temperature simulate (Sim) e relativo errore percentuale (sensori S1, S2, S4)

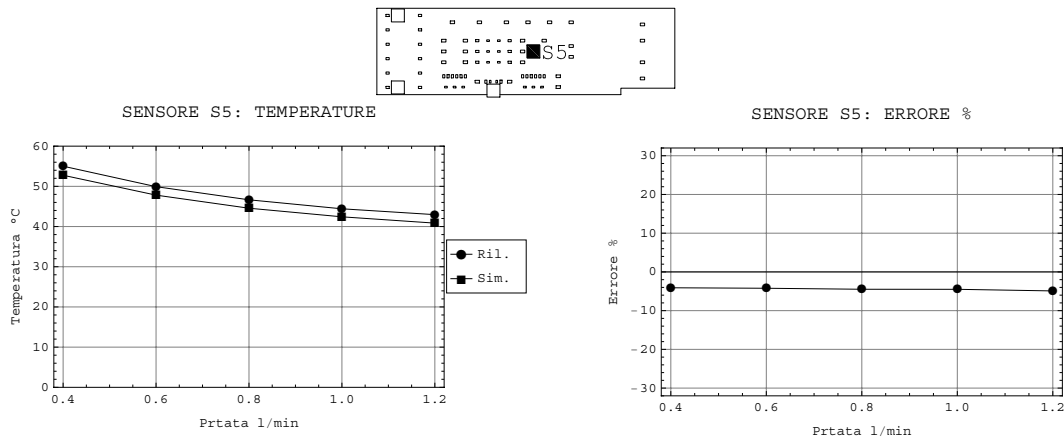


Figura 4.10: Confronti temperature rilevate (Ril) con temperature simulate (Sim) e relativo errore percentuale (sensore S5)

Si nota che il modello:

- segue quasi fedelmente i dati misurati nelle regioni occupate dai sensori F6, F8 ed S2;
- sovrastima tra il 12 ed il 20% la regione occupata da F7;
- sottostima leggermente (entro il 5%) nella zona centrale della scheda, misurata da S5;
- sottostima tra l'8 ed il 12% la regione occupata da S1;
- sottostima molto grossolanamente (fino a  $-30\%$ ) la regione intorno ad S4. La causa di un errore così elevato potrebbe essere attribuibile ad una temperatura reale della piastra localmente maggiore di quella risultante dall'interpolazione delle misure effettuate. A ciò, sempre localmente, potrebbe andare a sommarsi una possibile non omogeneità dello strato di pasta termo-conduttiva tra PCB e mensola.

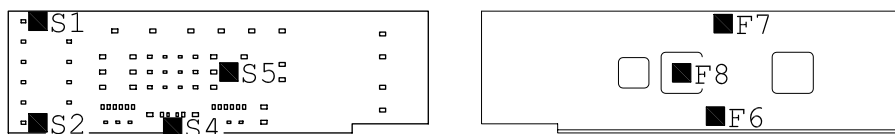


Figura 4.11: Disposizione dei sensori

L'entità dell'errore nella regione di S4 rivela comunque i limiti del modello (dati anche dalle forti semplificazioni adottate) nonostante i quali si ritiene che esso abbia dato risultati soddisfacenti.



# Capitolo 5

## Modello della scheda di front-end. Ultima versione proposta

I risultati ottenuti suggeriscono di estendere dati e semplificazioni anche ad un modello più realistico della scheda, basato sullo schema in Figura 1.7. Da quest'ultimo modello, ancora in fase di studio, non si richiedono risultati precisi, ma semplicemente un'indagine di massima delle regioni a temperatura maggiore.

### 1 Sottodomini e loro proprietà

Di seguito una descrizione dei sottodomini con le relative proprietà loro attribuite.

- *Componenti su PCB:*

MATERIALE: silicio. Si assume conducibilità termica  $k_{Si} = 163 \text{ W/mK}$ .

GENERAZIONE INTERNA: con riferimento alla Figura 5.2, si hanno i seguenti valori<sup>1</sup>

$$- Q_A = 3.08 \cdot 10^5 \text{ W/m}^3$$

---

<sup>1</sup>Valori ottenuti dai mW assegnati in progetto al componente divisi per il volume, in metri cubi, dell'elemento che lo rappresenta

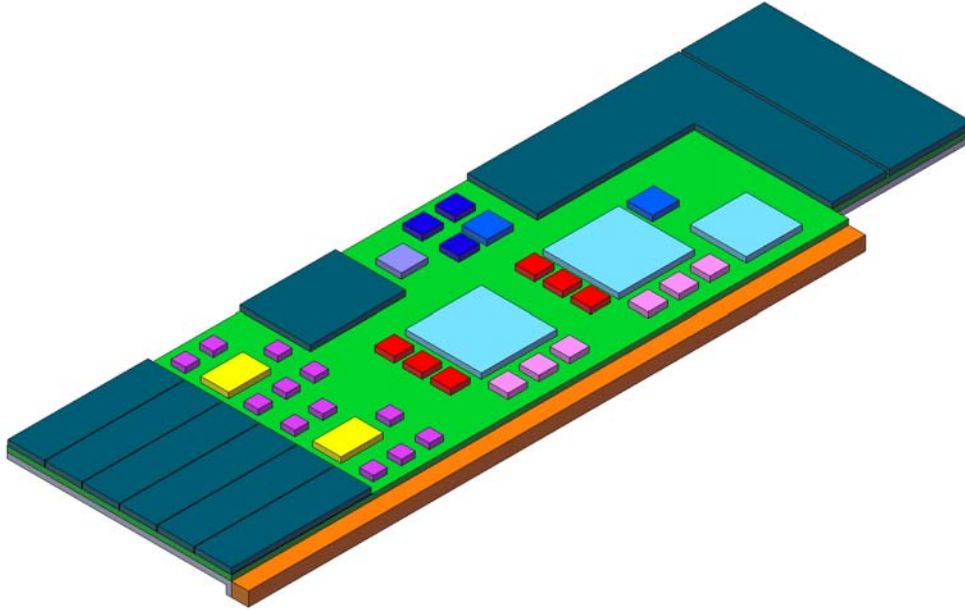


Figura 5.1: Assieme in 3D della scheda ultima versione

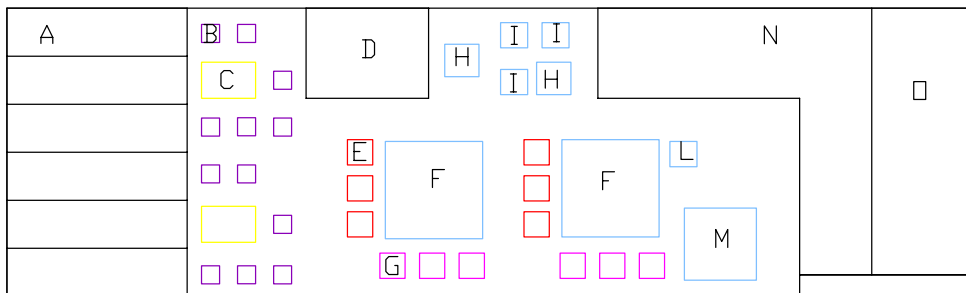


Figura 5.2: Schema in 2D con indicate le lettere corrispondenti ad elementi aventi la stessa potenza

- $Q_B = 2.00 \cdot 10^6 \text{ W/m}^3$
- $Q_C = 1.67 \cdot 10^6 \text{ W/m}^3$
- $Q_D = 8.82 \cdot 10^5 \text{ W/m}^3$
- $Q_E = 2.04 \cdot 10^6 \text{ W/m}^3$
- $Q_F = 2.06 \cdot 10^6 \text{ W/m}^3$
- $Q_G = 4.08 \cdot 10^6 \text{ W/m}^3$
- $Q_H = 4.68 \cdot 10^6 \text{ W/m}^3$
- $Q_I = 3.81 \cdot 10^6 \text{ W/m}^3$
- $Q_L = 5.85 \cdot 10^6 \text{ W/m}^3$
- $Q_M = 2.50 \cdot 10^6 \text{ W/m}^3$
- $Q_N = 3.52 \cdot 10^5 \text{ W/m}^3$
- $Q_O = 4.58 \cdot 10^5 \text{ W/m}^3$

- *PCB*:  
MATERIALE: considerato identico a quello delle schede di test. Viene quindi assegnato il valore  $k_{PCB} = 13.5 \text{ W/mK}$ .
- *Mensola*:  
MATERIALE: duralluminio. Si adotta la conducibilità termica  $k_M = 160 \text{ W/mK}$ .
- *Piastra*:  
MATERIALE: rame; conducibilità termica  $k_P = 400 \text{ W/mK}$ .

## 2 Condizioni al contorno

Di seguito le proprietà dei contorni ai quali non è stato attribuito l'isolamento termico.

- *Contatto componente-PCB*:  
CONDIZIONE: si è attribuito uno strato fittizio termicamente resistivo di spessore  $s = 0.1 \text{ mm}$  e conducibilità termica  $k_{R-PCB} = 0.83 \text{ W/mK}$ . Si ritiene accettabile il valore  $k_{R-PCB}$  in quanto era stato utilizzato in precedenza per simulare la non completa aderenza delle resistenze alla PCB, inoltre non è molto diverso da quello dichiarato per la pasta termo-conduttiva adottata nei contatti. Nei componenti a superficie di appoggio più vasta è infatti consigliabile interporre uno strato di pasta termo-conduttiva tra essi e la PCB prima della stagnatura.
- *Contatto PCB-mensola*: si considera applicato uno strato di composto termo-conduttivo non siliconico ELECTROLUBE HTC avente conducibilità termica nota.  
CONDIZIONE: si è attribuito un layer fittizio termicamente resistivo di spessore  $s = 0.1 \text{ mm}$  e conducibilità termica  $k_{PCB-M} = 0.9 \text{ W/mK}^2$
- *Contatto mensola-piastra*:  
CONDIZIONE: si è attribuito un layer fittizio termicamente resistivo di spessore  $s = 0.1 \text{ mm}$  e conducibilità termica  $k_{R-PCB} = 0.5 \text{ W/mK}$ . I valori sono gli stessi utilizzati nel modello della scheda di test.

---

<sup>2</sup>Dato fornito dal produttore

- *Superficie esterna della piastra di rame:*

CONDIZIONE: a seconda della portata di fluido refrigerante presa in considerazione, sono state attribuite le stesse distribuzioni paraboliche di temperatura adottate nel modello precedente.

### **3 Risultati**

Per ogni portata di fluido refrigerante sono riportati due grafici:

- il primo rappresenta la distribuzione delle temperature nella parte superiore della PCB
- nel secondo sono rappresentate le isosuperfici di 15 temperature, la distribuzione delle temperature sui componenti e le direzioni del flusso termico sulla mensola. La vista è da sotto la scheda, lato mensola.

I valori sono espressi in gradi Celsius.

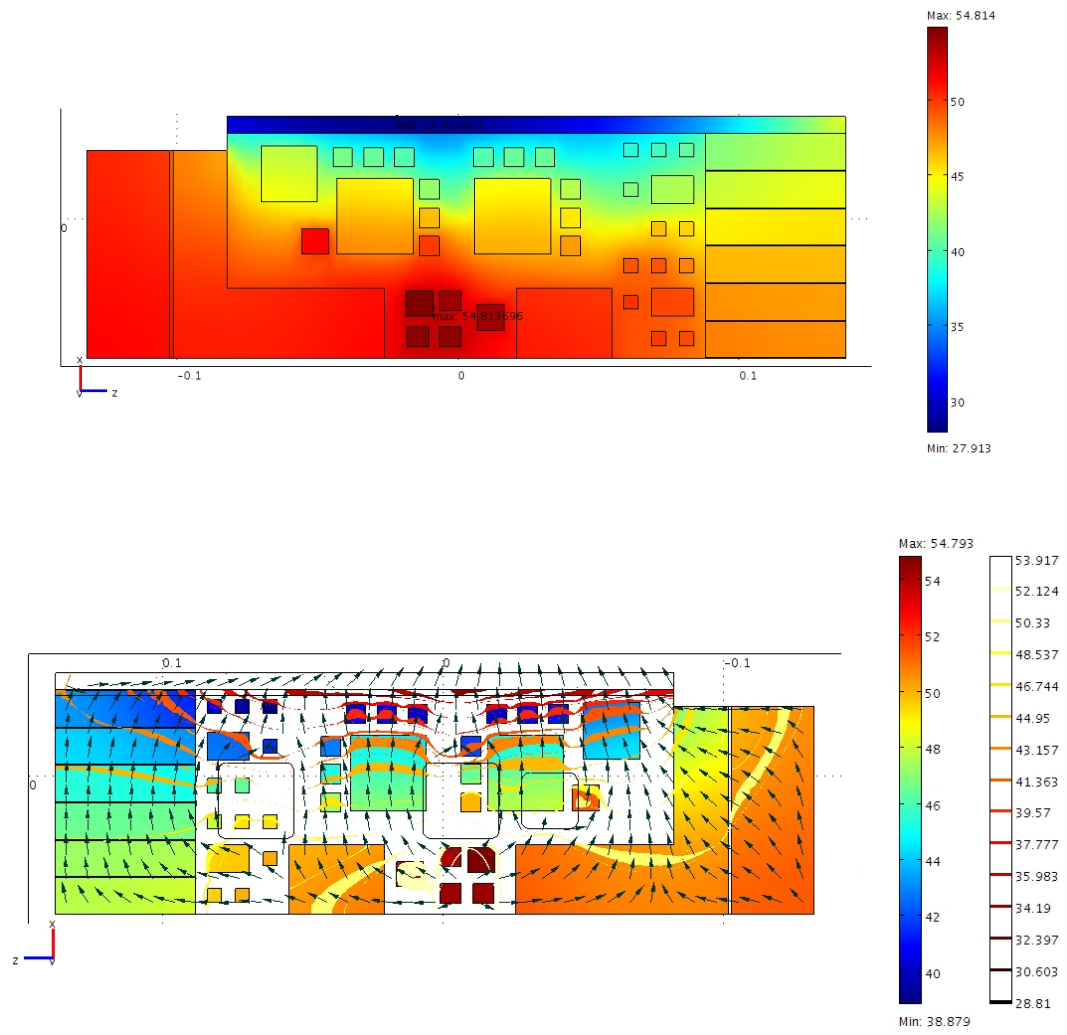


Figura 5.3: Risultati a 0.4 l/min

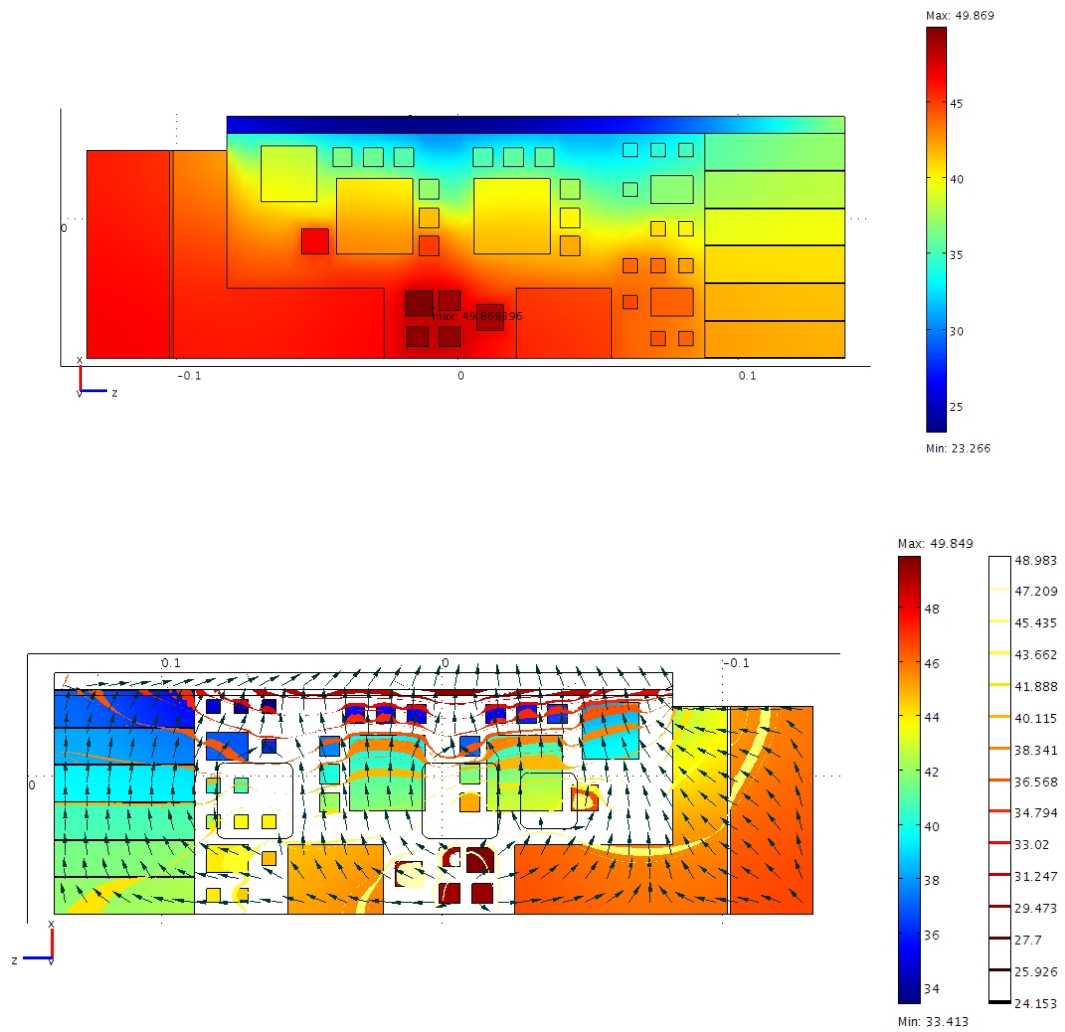


Figura 5.4: Risultati a 0.6 l/min

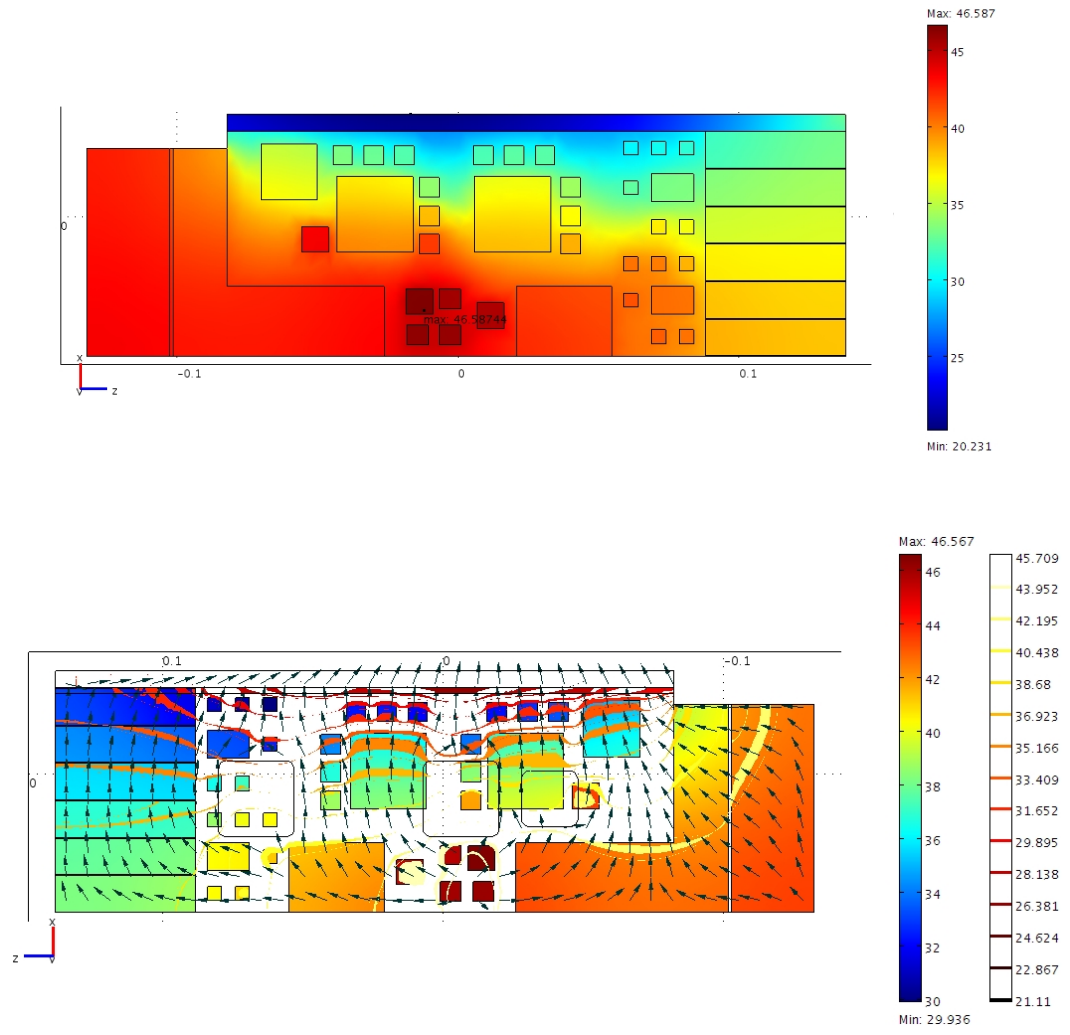


Figura 5.5: Risultati a 0.8 l/min

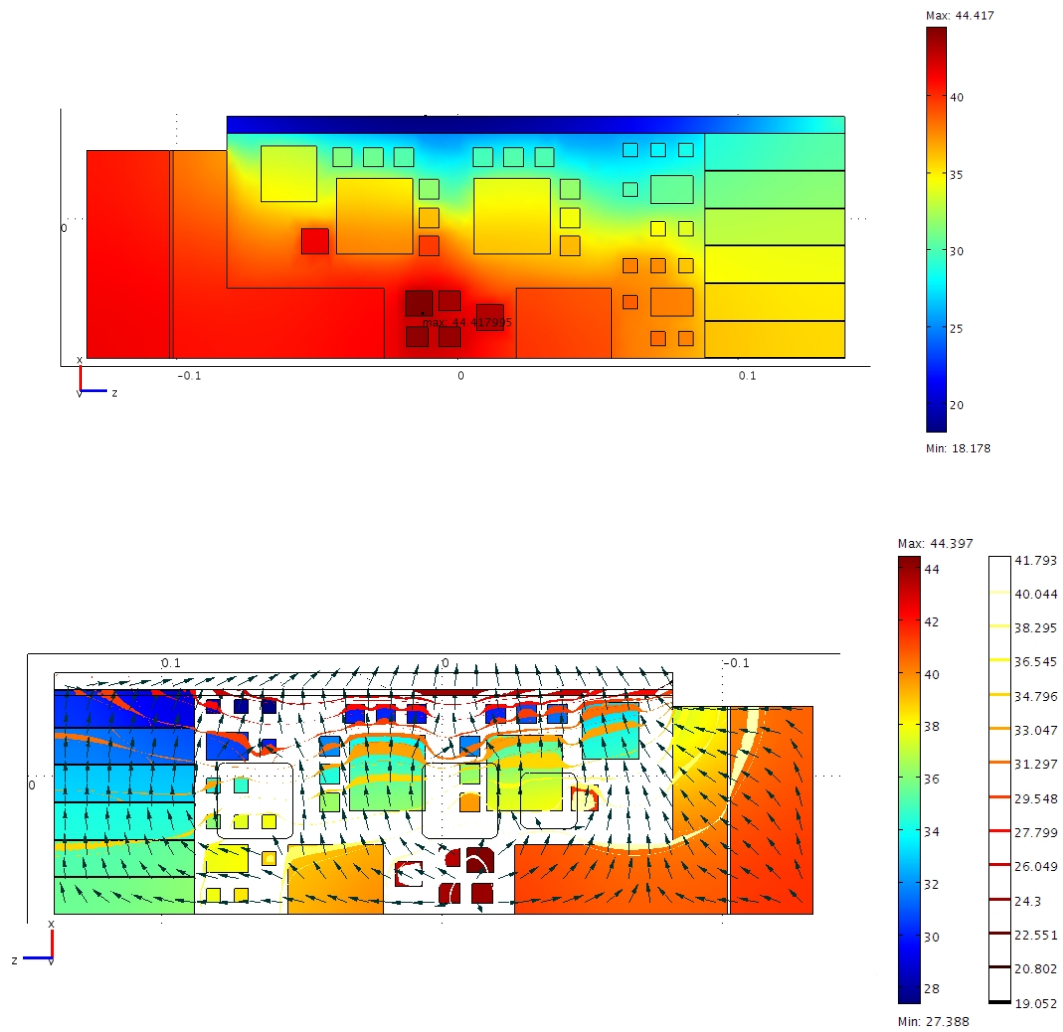


Figura 5.6: Risultati a 1.0 l/min

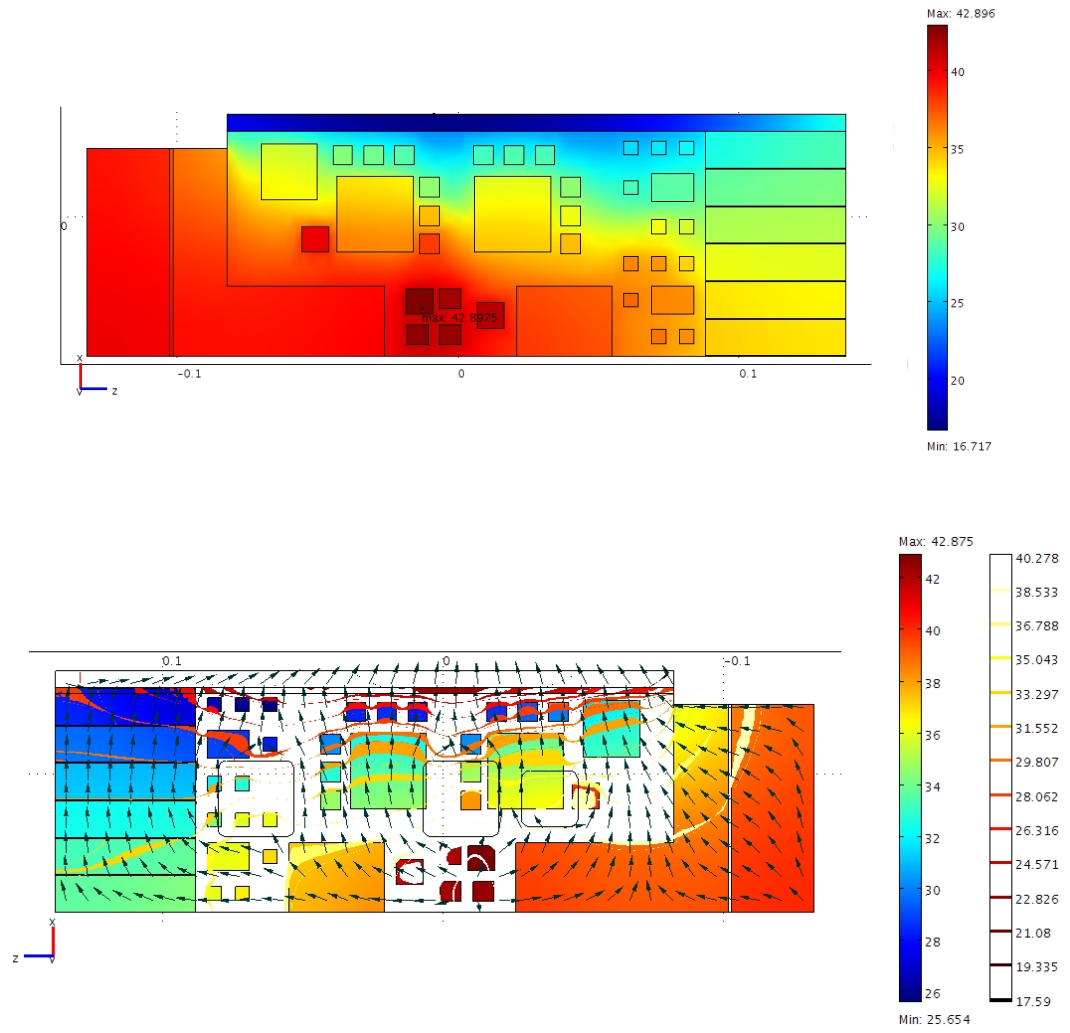


Figura 5.7: Risultati a 1.2 l/min

### 3.1 Analisi dei risultati

In Figura 5.8 si riporta l'andamento delle temperature massime simulate al variare della portata di raffreddamento.

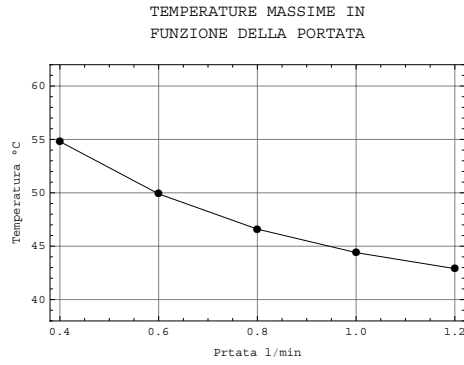


Figura 5.8: Temperature massime nei modelli simulati.

# Conclusioni

L'analisi svolta in questa tesi ha permesso di validare un modello FEM a fronte di dati sperimentali.

Lo studio, condotto prima su modelli unitari, è stato esteso allo studio delle schede già realizzate rivelando che le approssimazioni adottate sono notevoli, ma, nonostante ciò, i risultati ottenuti possono essere utilizzati, in via preliminare, per lo studio di situazioni analoghe con diversi lay-out della scheda finale.

Si è così giunti ad una serie di mappe di temperature sull'ultimo lay-out disponibile della scheda (non ancora realizzata) al variare della portata di raffreddamento utilizzata.





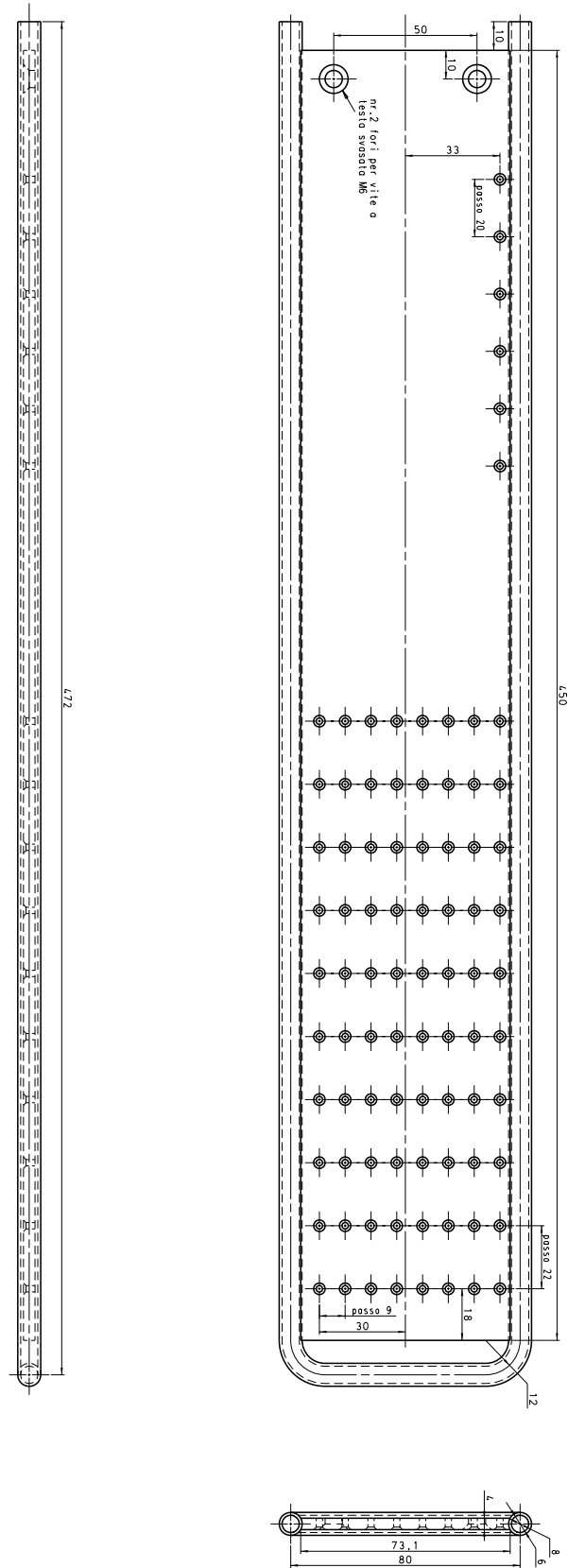


Figura A.2: Piastra di rame. Test in aria. Ipotesi abbandonata per il futuro

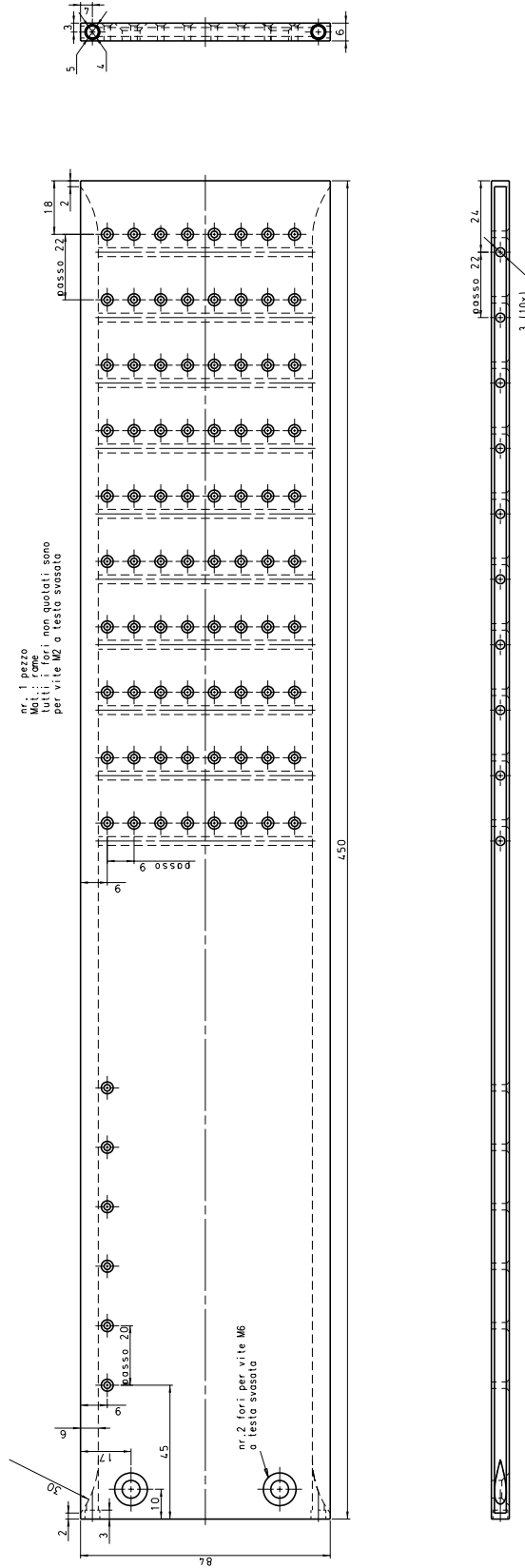


Figura A.3: Piastra di rame. Test in vuoto.



# Appendice B

## Test eseguiti a Napoli

### 1 Test in aria

#### 1.1 Descrizione del sistema

Presso l'INFN di Napoli sono state realizzate:

- scheda elettronica di simulazione secondo lo schema indicato in Figura 1.8;
- mensola in duralluminio secondo lo schema indicato in Figura A.1
- piastra in rame secondo lo schema indicato in Figura A.2

L'insieme è rappresentato in Figura B.1.

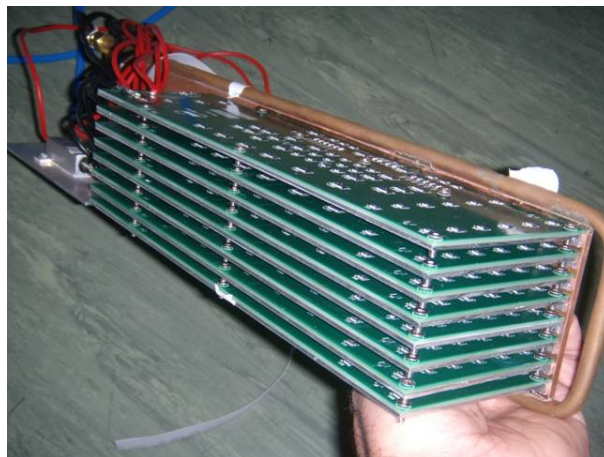


Figura B.1: Piastra di rame. Test in aria. Ipotesi abbandonata per il futuro

Con riferimento alla Figura B.2, al fine di eseguire le misurazioni, il blocco è stato attrezzato con:

- A alimentatore
- T1 termometro acqua in ingresso
- T2 termometro acqua in uscita
- F flussimetro
- valvola per la regolazione della portata

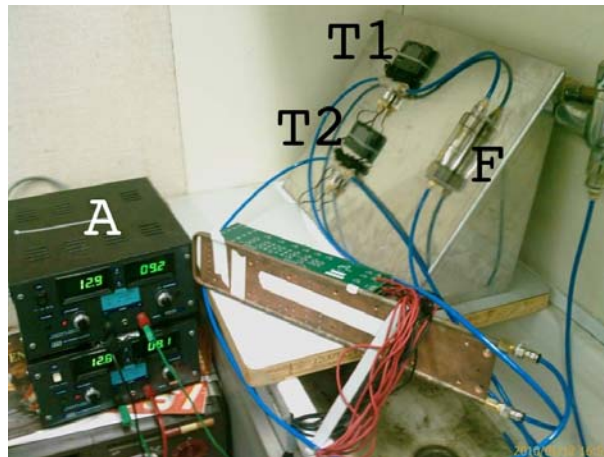
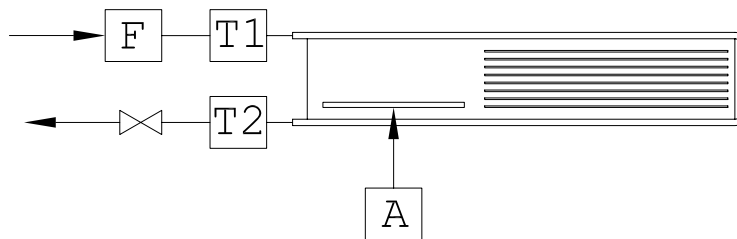


Figura B.2: Schema e foto test in aria

## 1.2 Risultati

Con le seguenti condizioni sperimentali:

- portata acqua di raffreddamento  $Q = 0.5$  l/min;
- temperatura di immissione dell'acqua:  $T_{in} = 16$  °
- temperatura dell'acqua in uscita dalla piastra:  $T_{out} = 20$  °

sono state misurate le temperature mediante termocamera. Le immagini sono riportate alle Figure B.3, B.4, B.5, B.6.

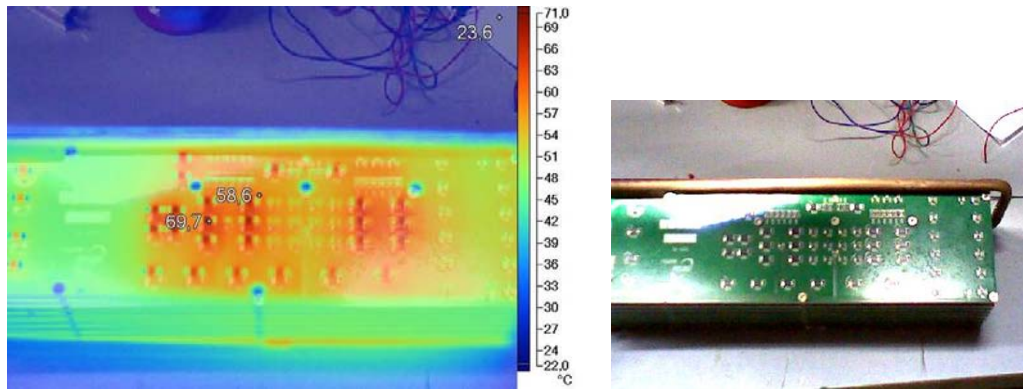


Figura B.3: Superficie superiore PCB

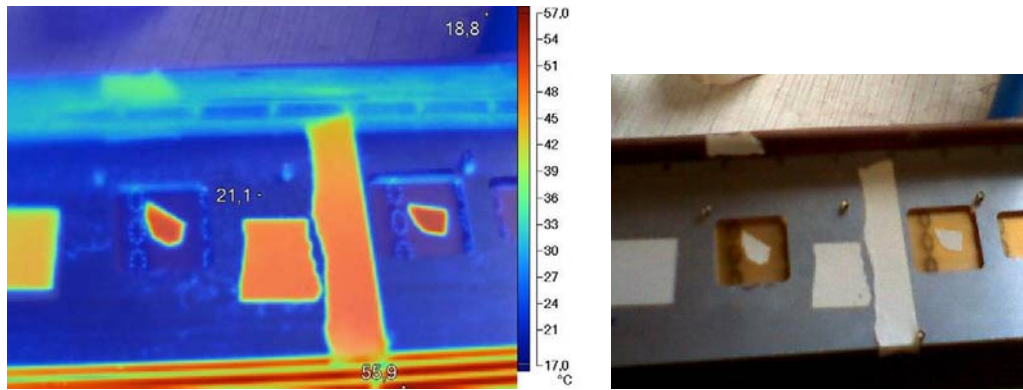


Figura B.4: Superficie inferiore mensola

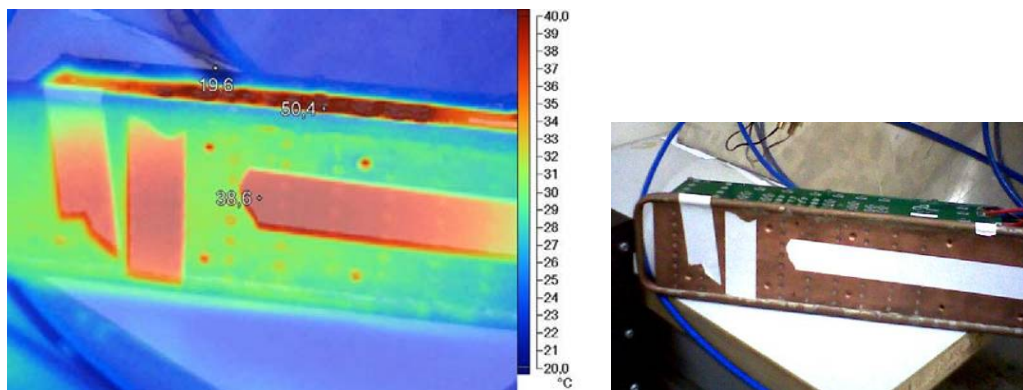


Figura B.5: Superficie esterna piastra

In breve:

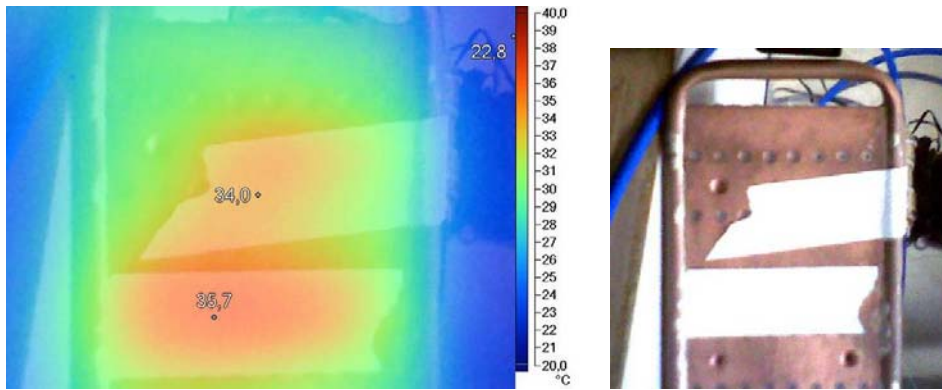


Figura B.6: Dettaglio superficie esterna piastra

Parte	$T$ [°C]
Lato superiore scheda elettronica	60
Lato inferiore scheda elettronica	55
Mensola in alluminio	50
Piastra di rame	40
Tubo di raffreddamento in rame	30

## 2 Test in vuoto. Descrizione sistema e risultati

Alla luce dei test preliminari in aria descritti prima, i tecnici dell'INFN di Napoli hanno modificato il disegno della piastra in rame secondo lo schema di Figura A.3.

Il sistema, attrezzato come già descritto nella sezione precedente, è stato poi posto in una camera a vuoto e le misure sono state effettuate ad una pressione variabile tra  $10^{-2}$  e  $10^{-3}$  bar. Di seguito, nelle Tabelle B.1 e B.2, i risultati numerici e, nelle Figure B.7 e B.7, i grafici dei valori con le posizioni dei sensori cui si riferiscono.

Sensore S1							Sensore S2						
t [min]	0.4 l/min	0.6 l/min	0.8 l/min	1.0 l/min	1.2 l/min	t [min]	0.4 l/min	0.6 l/min	0.8 l/min	1.0 l/min	1.2 l/min		
10	—	—	40.16	40.70	38.86	10	—	—	31.43	30.18	28.10		
20	—	46.65	41.57	41.06	39.90	20	—	36.62	32.21	30.34	28.81		
30	—	47.40	43.26	41.47	39.95	30	—	37.09	33.10	30.55	28.94		
40	53.09	47.56	43.62	41.53	39.90	40	43.04	37.19	33.29	30.66	28.91		
50	53.30	47.66	43.78	41.58	40.03	50	43.30	37.40	33.36	30.68	28.75		
60	53.56	47.69	43.84	41.61	40.05	60	43.40	37.35	33.38	30.62	28.87		
70	53.64	47.77	43.90	—	40.08	70	43.48	37.32	33.40	—	28.99		
Sensore S4							Sensore S5						
t [min]	0.4 l/min	0.6 l/min	0.8 l/min	1.0 l/min	1.2 l/min	t [min]	0.4 l/min	0.6 l/min	0.8 l/min	1.0 l/min	1.2 l/min		
10	—	—	38.91	38.34	36.52	10	—	—	44.05	43.79	42.05		
20	—	43.97	39.66	38.49	37.27	20	—	49.14	45.03	44.03	42.99		
30	—	44.42	40.56	38.71	37.35	30	—	49.74	46.16	44.31	42.94		
40	49.79	44.47	40.78	38.82	37.32	40	54.75	49.77	46.40	44.42	42.96		
50	50.05	44.75	40.91	38.84	37.22	50	54.94	50.00	46.53	44.44	42.94		
60	50.05	44.60	40.96	30.62	37.29	60	54.96	49.87	46.57	44.42	42.95		
70	50.10	44.62	41.06	—	37.35	70	55.01	49.92	46.65	—	42.96		
Sensore F1							Sensore F2						
t [min]	0.4 l/min	0.6 l/min	0.8 l/min	1.0 l/min	1.2 l/min	t [min]	0.4 l/min	0.6 l/min	0.8 l/min	1.0 l/min	1.2 l/min		
10	—	—	20.81	19.69	18.03	10	—	—	23.27	21.74	19.90		
20	—	24.26	21.30	19.88	18.23	20	—	27.35	23.86	21.90	20.13		
30	—	24.62	21.86	20.06	18.42	30	—	27.74	24.47	22.05	20.26		
40	29.45	24.91	21.82	20.01	18.70	40	33.25	28.00	24.42	22.01	20.49		
50	29.40	24.94	21.73	20.05	18.26	50	33.22	28.00	24.34	22.16	20.16		
60	29.66	25.09	21.74	20.13	18.55	60	33.53	28.13	24.34	22.34	20.36		
70	29.61	25.14	21.84	—	18.83	70	33.48	28.21	24.47	—	20.57		

Tabella B.1

Sensore F3						Sensore F4					
t [min]	0.4 l/min	0.6 l/min	0.8 l/min	1.0 l/min	1.2 l/min	t [min]	0.4 l/min	0.6 l/min	0.8 l/min	1.0 l/min	1.2 l/min
10	—	—	20.10	21.30	19.84	10	—	—	19.06	17.61	16.70
20	—	26.55	22.03	21.52	19.90	20	—	22.57	19.61	17.88	16.47
30	—	26.96	23.96	21.74	20.03	30	—	23.12	20.23	18.08	16.49
40	32.21	27.30	23.88	21.68	20.23	40	28.05	23.38	20.19	17.96	16.68
50	32.13	27.17	23.78	21.70	20.03	50	27.79	23.12	20.04	18.08	16.68
60	32.47	27.35	23.77	21.79	20.16	60	28.26	23.22	20.00	18.23	16.71
70	32.42	27.45	24.00	—	20.29	70	28.21	23.43	20.39	—	16.75
Sensore F5						Sensore F6					
t [min]	0.4 l/min	0.6 l/min	0.8 l/min	1.0 l/min	1.2 l/min	t [min]	0.4 l/min	0.6 l/min	0.8 l/min	1.0 l/min	1.2 l/min
10	—	—	27.22	25.40	23.53	10	—	—	28.91	27.56	26.00
20	—	31.97	27.88	25.55	23.74	20	—	33.17	29.49	27.75	26.16
30	—	32.44	28.58	25.69	23.82	30	—	33.69	30.17	27.92	26.13
40	38.70	32.68	28.58	25.68	23.92	40	39.43	33.92	30.19	27.87	26.31
50	38.73	32.70	28.56	25.74	23.79	50	39.38	34.08	30.14	27.94	26.21
60	39.04	32.73	28.57	25.82	23.81	60	39.69	33.90	30.16	28.03	26.22
70	39.04	32.81	28.73	—	23.82	70	39.66	34.03	30.39	—	26.23
Sensore F7						Sensore F8					
t [min]	0.4 l/min	0.6 l/min	0.8 l/min	1.0 l/min	1.2 l/min	t [min]	0.4 l/min	0.6 l/min	0.8 l/min	1.0 l/min	1.2 l/min
10	—	—	34.03	32.88	31.06	10	—	—	42.88	42.08	40.29
20	—	38.68	34.79	33.09	31.53	20	—	47.56	43.64	42.21	40.68
30	—	39.19	35.64	33.31	31.58	30	—	47.95	44.48	42.39	40.75
40	46.08	39.43	35.70	33.31	31.74	40	53.40	48.18	44.61	42.43	40.94
50	44.88	39.48	35.71	33.36	31.53	50	53.51	48.18	44.68	42.47	40.78
60	45.09	39.51	35.74	33.43	31.60	60	53.58	48.36	44.70	42.52	40.82
70	45.09	39.58	35.90	—	31.66	70	53.53	48.47	44.91	—	40.86

Tabella B.2

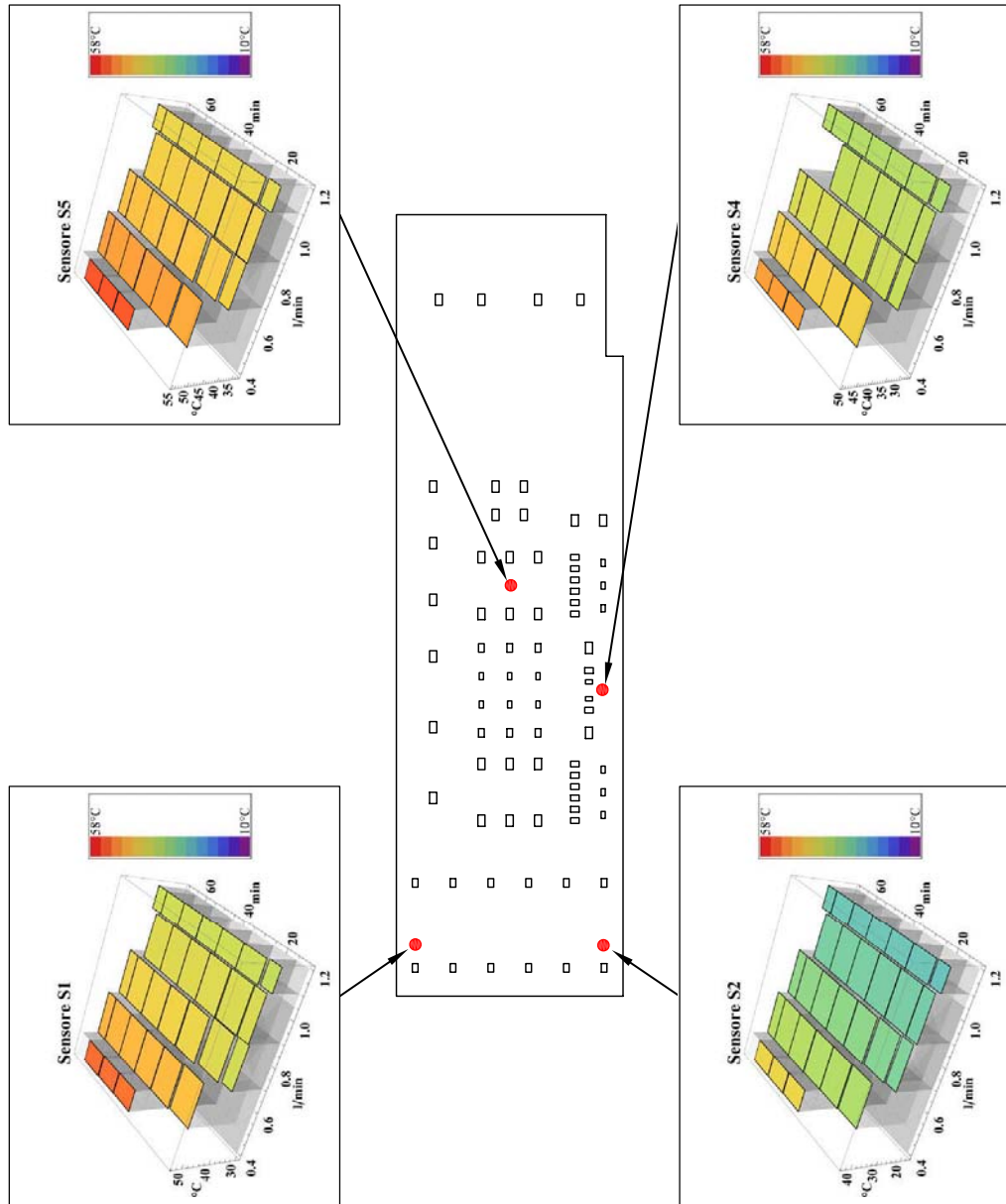


Figura B.7

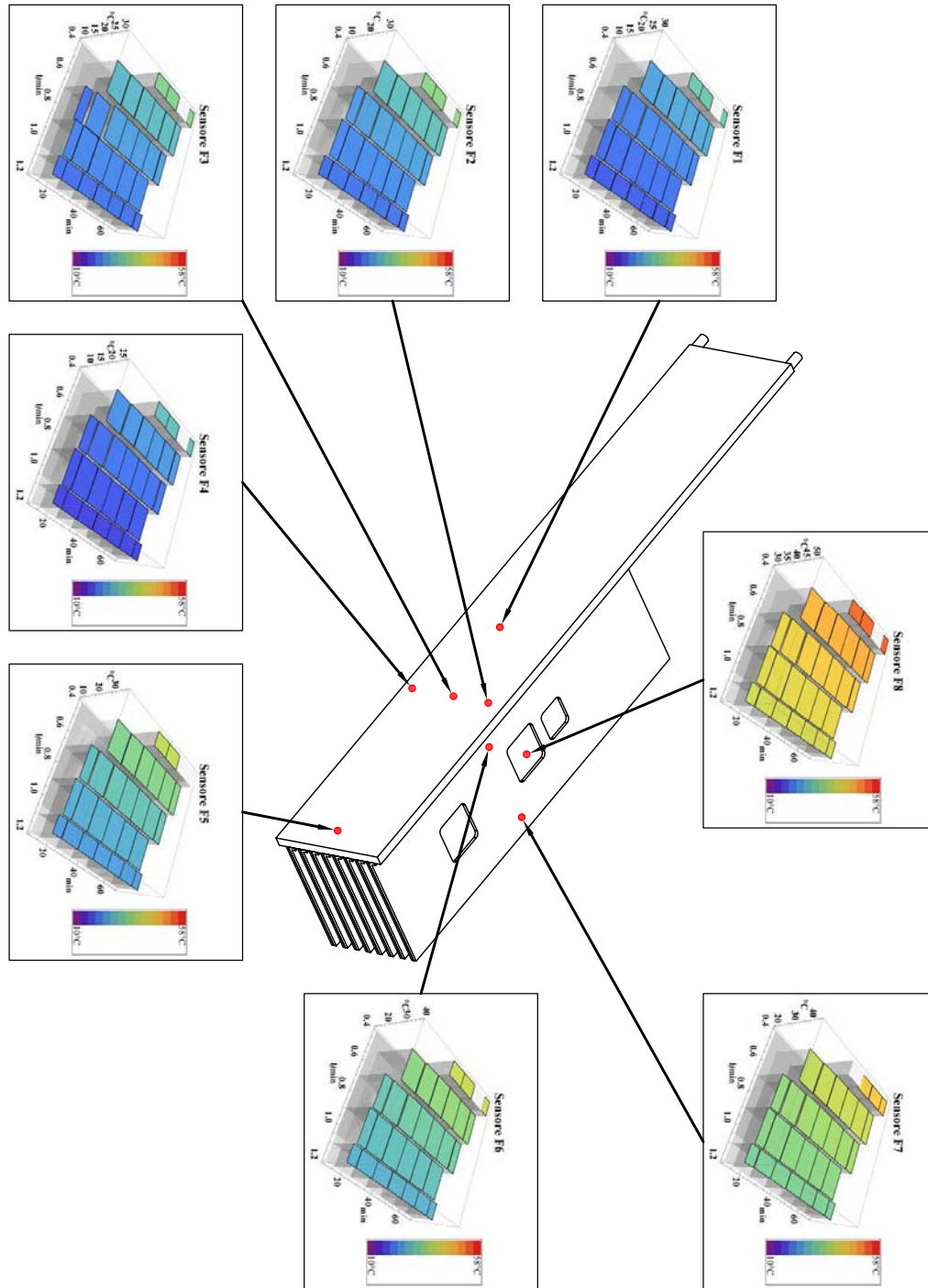


Figura B.8

# Appendice C

## Interpolazioni temperature parete

Con il seguente listato<sup>1</sup> si sono ottenute le distribuzioni di temperatura secondo i valori rilevati con i sensori. Tali distribuzioni sono state assegnate come condizione al contorno sulla parete esterna della piastra di rame in tutti i modelli completi.

```
Clear["Global`*"]
offset=84*10^-3;
x1=11*10^-3-offset;
x2=84*10^-3-offset;
x3=194*10^-3-offset;
fs04[x_]:=N[Simplify[
  InterpolatingPolynomial[{{x1,29.61},{x2,28.21},{x3,39.04}},x]]]
fs06[x_]:=N[Simplify[
  InterpolatingPolynomial[{{x1,25.14},{x2,23.43},{x3,32.81}},x]]]
fs08[x_]:=N[Simplify[
  InterpolatingPolynomial[{{x1,21.84},{x2,20.39},{x3,28.73}},x]]]
fs10[x_]:=N[Simplify[
  InterpolatingPolynomial[{{x1,20.13},{x2,18.23},{x3,25.82}},x]]]
fs12[x_]:=N[Simplify[
  InterpolatingPolynomial[{{x1,18.83},{x2,16.75},{x3,23.82}},x]]]
```

Si riportano le funzioni inserite in Comsol con unità di misura:

per 0,4 l/min:  $28.21[\text{degC}] + 27.7464[\text{degC/m}] * z + 642.801[\text{degC/m}^2] * (z^2)$

---

<sup>1</sup>Mathematica © Wolfram Research, Inc.

per 0,6 l/min:  $23.43 [\text{degC}] + 19.9355 [\text{degC/m}] * z + 593.975 [\text{degC/m}^2] * (z^2)$   
 per 0,8 l/min:  $20.39 [\text{degC}] + 18.3049 [\text{degC/m}] * z + 522.848 [\text{degC/m}^2] * (z^2)$   
 per 1,0 l/min:  $18.23 [\text{degC}] + 11.8797 [\text{degC/m}] * z + 519.275 [\text{degC/m}^2] * (z^2)$   
 per 1,2 l/min:  $16.75 [\text{degC}] + 8.51182 [\text{degC/m}] * z + 506.917 [\text{degC/m}^2] * (z^2)$

ed i relativi andamenti su grafico (Figura C.1)<sup>2</sup>

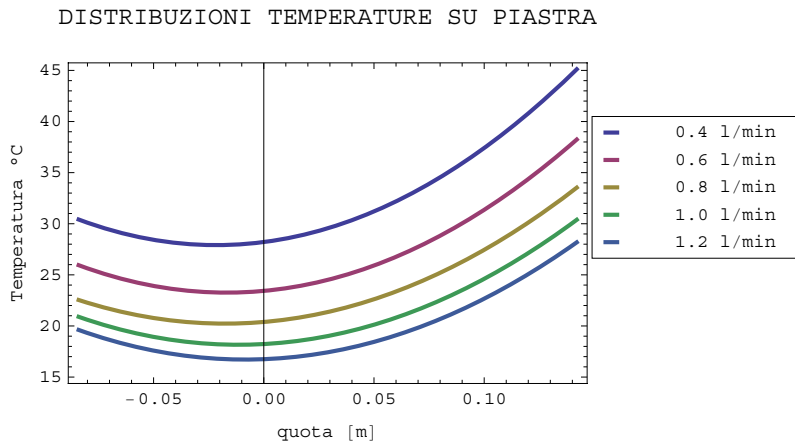


Figura C.1

<sup>2</sup>Posizione dello zero e scala sono riferiti al sistema di riferimento adottato nel programma.

# Bibliografia

- [1] AMORE, I., 2004. *Fasci di ioni radioattivi ad energie intermedie ai Laboratori Nazionali del Sud*. Tesi di Laurea in Fisica, Università degli Studi di Catania. Disponibile su:  
<[http://www.lns.infn.it/FRIBS/thesis/tesi\\_amore.pdf](http://www.lns.infn.it/FRIBS/thesis/tesi_amore.pdf)>  
[Data di accesso: 30/10/2010]
- [2] MARCHI, T., 2006. *Rivelatori a scintillazione per esperimenti di fisica nucleare*. Tesi di Laurea in Fisica, Università degli Studi di Bologna. Disponibile su:  
<<http://www.bo.infn.it/nucl-ex/TesiMarchi.pdf>>  
[Data di accesso: 30/10/2010]
- [3] MARCHI, T., 2008. *La rivelazione dei neutroni in esperimenti di fisica nucleare: problematiche e studio di scintillatori organici*. Tesi di Laurea Specialistica in Fisica, Università degli Studi di Bologna. Disponibile su:  
<[http://www.bo.infn.it/nucl-ex/TESI\\_TOMMASO\\_MARCHI.pdf](http://www.bo.infn.it/nucl-ex/TESI_TOMMASO_MARCHI.pdf)>  
[Data di accesso: 30/10/2010]
- [4] REA, C., 2008. *Studio di nuclei esotici non legati*. Tesi di Laurea in Fisica, Università degli Studi di Bologna. Disponibile su:  
<<http://www.bo.infn.it/nucl-ex/TesiCristina.pdf>>  
[Data di accesso: 30/10/2010]
- [5] LOMBARDO, D., 2008. *Analisi termofluidodinamica agli elementi finiti dei processi di assorbimento e desorbimento di idrogeno in idruri metallici*. Tesi di Laurea Magistrale in Chimica Industriale, Università degli Studi di Torino. Disponibile su:

<[http://aperto.unito.it/bitstream/2318/449/1/tesi\\_laurea\\_fulltext.pdf](http://aperto.unito.it/bitstream/2318/449/1/tesi_laurea_fulltext.pdf)>  
[Data di accesso: 30/10/2010]

- [6] ROMANO, M., 2007. *Studio degli effetti di channeling in rivelatori al silicio per misure di fisica nucleare*. Tesi di Laurea in Fisica, Università degli Studi di Bologna. Disponibile su:  
<[http://www.bo.infn.it/romano/docs/Romano-tesi\\_triennale.pdf](http://www.bo.infn.it/romano/docs/Romano-tesi_triennale.pdf)>  
[Data di accesso: 30/10/2010]
- [7] ROSSI DI SCHIO, E., 2007. *Laboratorio Computazionale di Termofluidodinamica L*. Dispense, Università degli Studi di Bologna.
- [8] CESARI, F., 1996. *Introduzione al Metodo degli Elementi Finiti*. Pitagora Editrice, Bologna.
- [9] COCCHI, A., 1998. *Elementi di termofisica generale e applicata*. Società Editrice Esculapio, Bologna.
- [10] COMSOL AB., 2008. *Comsol Multiphysics. Reference guide*.
- [11] COMSOL AB., 2008. *Heat transfer module. User's guide*.
- [12] COMSOL AB., 2008. *Heat transfer module. Model library*.