







## Prestazioni termiche dei dissipatori di calore commerciali utilizzati con i moduli Peltier: effetto della distanza tra le alette e della convezione

### Desempeño térmico de disipadores de calor comerciales que usan modelos Peltier: efecto de espaciamiento y convección

Alvarado-Juárez, Roberto \*<sup>a</sup>, Rivera-Hernández, David Antonio<sup>b</sup>, Guzmán-Cortes, Jhonatan Alberto<sup>c</sup> e Rodríguez-Brito, Diana Isabel<sup>d</sup>

<sup>a</sup>  Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz •  E-5222-2013 •  0000-0002-4153-3626 •  438170

<sup>b</sup>  Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz •  OJV-4587-2025 •  0009-0009-9285-3548

<sup>c</sup>  Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz •  OJU-5336-2025 •  0009-0008-0406-0007

<sup>d</sup>  Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz •  F-6231-2016 •  0000-0002-4214-143X •  171826

**Classificazione:**

**DOI:** <https://doi.org/10.35429/P.2025.1.63.76>

Area: Ingegneria

Campo: Ingegneria

Disciplina: Ingegneria meccanica

Sottodisciplina: Ingegneria termica

#### Punti chiave del manuale

Il contributo principale riguarda il campo dell'ingegneria termica applicata ai dissipatori di calore. È stato analizzato l'effetto della spaziatura delle alette, l'effetto convettivo  $h$  e l'effetto radiativo, cosa che non è stata fatta in altri studi. Gli aspetti chiave da comprendere sono i meccanismi di trasferimento del calore (conduzione, convezione e radiazione). La comprensione delle condizioni al contorno realistiche nella simulazione che si avvicinano alle condizioni reali. Interpretazione e analisi numerica per la comprensione dei risultati. Si è osservato che nel dissipatore sul lato freddo non ci sono differenze significative nei risultati rispetto al numero di alette utilizzate. Nel dissipatore sul lato caldo è stata osservata un'influenza significativa sulle differenze di temperatura all'aumentare del coefficiente convettivo di trasferimento del calore. La temperatura diminuisce da 84,8 °C a 50,7 °C dalla base del dissipatore all'estremità delle alette.

**Area:** Rafforzamento della comunità scientifica

**Citazione:** Alvarado-Juárez, Roberto, Rivera-Hernández, David Antonio, Guzmán-Cortes, Jhonatan Alberto e Rodríguez-Brito, Diana Isabel. 2025. Prestazioni termiche dei dissipatori di calore commerciali utilizzati con i moduli Peltier: effetto della distanza tra le alette e della convezione. 63-76. PIREQA.

\* ✉ [\[robertoalvaradoj@gmail.com\]](mailto:robertoalvaradoj@gmail.com)

**URL dello scaffale del manuale:** <https://www.pireqa.org/proceedings.php>



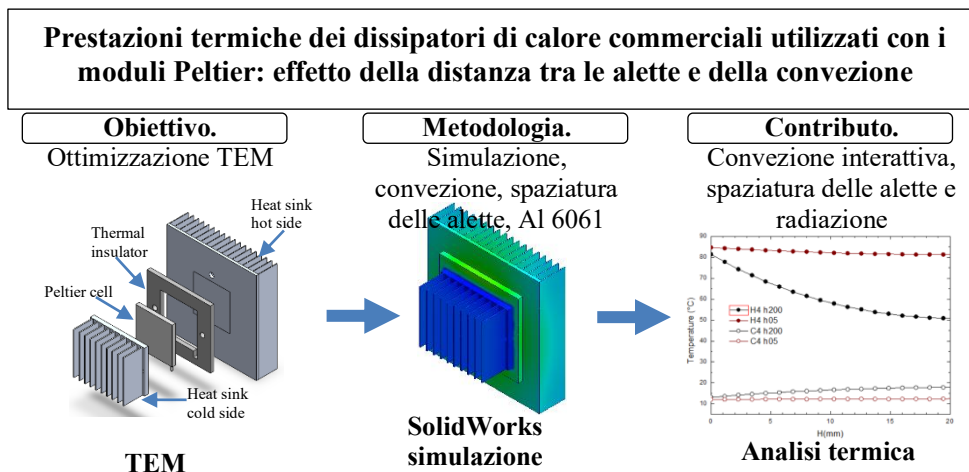
ISBN 978-607-8948-70-3 /©2009 Autore/i. Pubblicato da PIREQA-México, S.C. per la sua Holding Mexico per conto dell'Proceeding PIINI. Questo è un libro ad accesso libero con licenza CC BY-NC-ND [<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>]

Revisione tra pari sotto la responsabilità del Comitato Scientifico MARVID®- nel contributo al processo di revisione tra pari in ambito scientifico, tecnologico e dell'innovazione attraverso la formazione delle risorse umane per la continuità nell'analisi critica della ricerca internazionale.



## Sommario

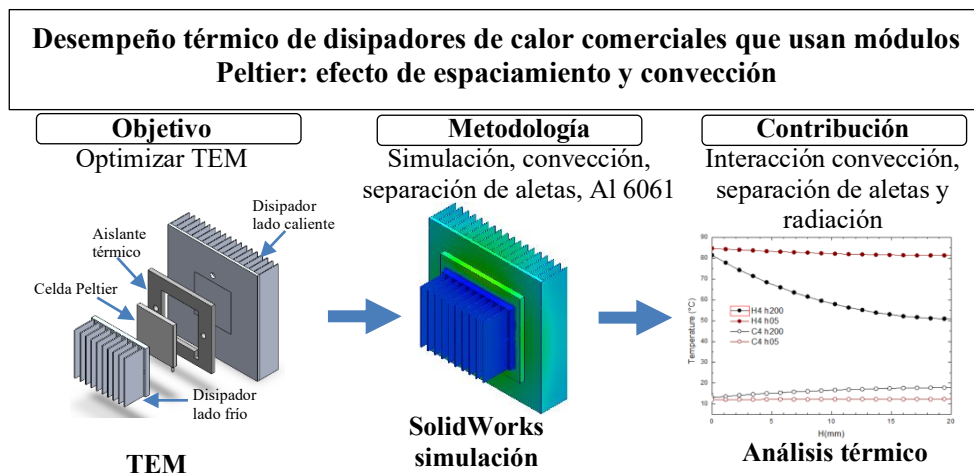
I moduli termoelettrici [TEM] sono ampiamente utilizzati per il raffreddamento dei dispositivi elettronici grazie alle loro dimensioni ridotte e al fatto che non producono rumore, oltre che perché non richiedono refrigeranti, rendendoli quindi ecologici. Per garantire l'efficienza dei TEM, è necessario controllare la temperatura sul lato caldo. Questa ricerca riporta la simulazione effettuata su un dissipatore di calore di un TEM commerciale con un modulo Peltier. L'analisi è stata effettuata sull'aletta centrale per 4 casi di separazione delle alette sul lato freddo e caldo [ $p=5,08, 3,81, 2,54, 1,27$  mm] e 6 casi di trasferimento di calore per convezione [ $h=5, 20, 50, 100, 150$  e  $200$   $W/m^2\cdot K$ ]. I risultati mostrano che il comportamento termico è simile per ogni separazione delle alette senza differenze significative di temperatura. Le differenze principali sono state osservate sul lato caldo, dove il caso  $p=1,27$  mm e  $h=200$   $W/m^2\cdot K$  è l'opzione migliore per ridurre la temperatura del dissipatore di calore sul lato caldo di un TEM. Infine, la comprensione di come la geometria e la convezione influenzano la temperatura consente di prendere decisioni nella scelta del dissipatore di calore adeguato.



## Dissipatore di calore, Modulo Peltier, Analisi termica, Spaziatura delle alette

### Resumen

Los módulos termoelectrónicos [TEM] son ampliamente usados para el enfriamiento de dispositivos electrónicos debido a su tamaño y por ser silenciosos, también porque no requieren de un refrigerante por lo que son amigables con el medio ambiente. Para la eficiencia de un TEM es necesario controlar la temperatura del lado caliente. Este trabajo reporta la simulación hecha a un disipador de un TEM con celda Peltier. El análisis fue realizado en la aleta central para 4 casos de separación de aletas colocadas en el lado frío y en el lado caliente [ $p=5.08, 3.81, 2.54, 1.27$  mm] y 6 casos de coeficiente convectivo de transferencia de calor [ $h=5, 20, 50, 100, 150$  and  $200$   $W/m^2\cdot K$ ]. Los resultados muestran que el comportamiento térmico es similar para los casos de separación de aleta sin diferencia de temperatura significativas. Las principales diferencias se observaron en el lado caliente donde el caso de  $p=1.27$ mm y  $h=200$   $W/[m^2\cdot K]$  es la mejor opción para disminuir la temperatura del disipador en la cara caliente del TEM. Por último, el entendimiento de como la geometría y la convección afectan la temperatura, permite tomar decisiones en la selección del adecuado disipador de calor.



## Disipador de calor, Celda Peltier, Análisis térmico, Espaciamiento entre aletas

## 1. Introduzione

L'introduzione dei moduli termoelettrici [TEM] è avvenuta principalmente nel raffreddamento di dispositivi elettronici per l'esercito e la tecnologia militare. Negli ultimi dieci anni, l'attenzione si è spostata su altri settori, principalmente per il raffreddamento e la generazione di energia elettrica.

Un modulo Peltier è un TEM in grado di produrre una differenza di temperatura quando viene alimentato con corrente elettrica. Questo TEM è compatto, non richiede refrigeranti ed è quindi ecologico. Le celle Peltier per il raffreddamento hanno il vantaggio di poter essere utilizzate in dispositivi di piccole dimensioni e di produrre un rumore praticamente nullo [Hájovský et al., 2016].

Nonostante i grandi vantaggi, il modulo Peltier presenta ancora dei limiti: l'efficienza o il malfunzionamento di un TEM è correlato al sovraccarico o alla sollecitazione [Nasri et al., 2017]. A causa del comportamento termico della cella Peltier, vengono utilizzati dissipatori di calore per regolare la temperatura assorbendo o dissipando il calore da un fluido attraverso le alette estese [Korprasertsak e Leephakpreeda, 2017].

In molte situazioni in cui il trasferimento di calore avviene per convezione libera [basso trasferimento di calore connettivo], le alette sono la soluzione migliore grazie al loro costo ridotto e al funzionamento senza problemi. Il peso e le dimensioni delle apparecchiature sono i parametri più importanti della progettazione [Shate e Sanap, 2019].

### 1.1 Rilevanza e applicazione tecnologica

La maggior parte dei processi di raffreddamento convenzionali utilizza ammoniaca, freon o altri refrigeranti che vengono rilasciati nell'atmosfera. Un'alternativa adeguata che non richiede queste sostanze è l'uso di moduli termoelettrici. Un altro vantaggio che li ha resi attraenti per le applicazioni elettroniche è la loro dimensione ridotta, ideale per diverse applicazioni. In termini di manutenzione, un TEM richiede un'attenzione minima poiché non ha parti mobili. Tuttavia, il problema principale di questo dispositivo è la sua prestazione di raffreddamento rispetto ai sistemi di raffreddamento tradizionali.

I vantaggi del TEM non sono solo legati al fatto che è ecologico, ma anche alla sua versatile applicazione per l'uomo, come il generatore termoelettrico, un dispositivo che trasforma il calore in energia elettrica, nelle automobili come un dispositivo di raffreddamento, dissipando l'energia dai dispositivi elettronici, nei frigoriferi termoelettrici, nelle applicazioni mediche per il raffreddamento dei medicinali, tra le altre applicazioni [Kudva et al., 2020 e Shilpa et al., 2022].

L'ampia gamma di applicazioni del TEM ha portato il mercato globale a crescere da 7 miliardi di dollari nel 2019 a circa 13,5 miliardi di dollari nel 2025, con una proiezione di 20 miliardi di dollari entro il 2029. La domanda in maggiore crescita si registra nel settore delle comunicazioni e dell'elettronica di consumo [Li et al., 2024]. Questa crescente domanda evidenzia l'importanza di sviluppare TEM efficienti, compatti ed ecologici, di conseguenza, la ricerca sui TEM per i sistemi di raffreddamento ha suscitato enorme interesse.

### 1.2 Stato dell'arte

Diversi studi indagano come migliorare la dissipazione del calore. Alcuni studi riguardano l'effetto dello spazio tra le alette, l'altezza, lo spessore, la disposizione delle alette, ecc.

Ventola et al. [2016] hanno studiato un modello termico di un dissipatore di calore a piastre alettate che può avere un'ampia applicazione. Gli autori hanno condotto studi sperimentali su un dissipatore di calore commerciale mostrato nella tabella 1. Le velocità studiate vanno da 5,6 a 13,9 m/s [Re=528-2481]. Gli autori hanno proposto una metodologia basata su algoritmi genetici per la selezione di parametri efficaci che possono essere trasferibili ad altri problemi termici. Lo studio menziona una possibile riduzione del volume del materiale fino al 53%.

Abdelmohimen et al. [2021] hanno condotto un'indagine numerica su diverse disposizioni delle alette su un dissipatore di calore a piastre alettate. Per lo studio, gli autori hanno tagliato le alette in più parti per migliorare le prestazioni del dissipatore di calore. Le dimensioni del caso di base sono riportate nella Tabella 1. Il numero di Reynolds studiato variava da 1333 a 5334.

Gli autori hanno concluso che il flusso parallelo riduce la resistenza termica. Una maggiore riduzione della resistenza termica si ottiene nel caso di tre scivoli, mentre l'uso di scivoli con flusso parallelo non fornisce il miglioramento richiesto della resistenza termica.

Al-Luhaibi e Nazzal [2023] studiano il trasferimento di calore nelle alette del dissipatore di calore solide e perforate. L'obiettivo era quello di collocare perforazioni strategiche per aumentare l'area senza aumentare le dimensioni del dissipatore di calore. Il trasferimento di calore può essere migliorato con fori nelle alette, poiché i fori aumentano la turbolenza. Inoltre, l'efficienza delle alette aumenta con il loro diametro. Il peso è stato ridotto fino al 7,03% rispetto a un dissipatore di calore solido. I parametri del dissipatore di calore sono riportati nella Tabella 1.

Rodríguez-Muñoz et al. [2023] analizzano il comportamento termico di un microchip per computer utilizzando il software Solid-Works. Il confronto è stato effettuato con alette rettangolari, quadrate, triangolari, paraboliche e circolari in lega di alluminio Al-6061. Gli autori hanno riscontrato che le alette rettangolari hanno un comportamento termico migliore rispetto a quelle quadrate e che la configurazione migliore è quella delle alette circolari, poiché presentano una zona di riscaldamento minore e una differenza di temperatura minore tra le zone con temperatura più alta e quelle con temperatura più bassa. I parametri del dissipatore di calore sono riportati nella Tabella 1.

Alomía [2025] ha simulato un dissipatore termico per migliorare il trasferimento di calore per applicazioni elettroniche. Sono state analizzate due configurazioni di alette e materiali. I casi analizzati riguardavano l'alluminio 6061-T6 e 1050. Per la simulazione è stato utilizzato Ansys. Dai risultati è stata ottenuta una resistenza termica di 3,35 °C/W e 2,84 °C/W rispettivamente per l'alluminio 6061-T6 e 1050. Il COP calcolato era 0,298. I risultati hanno mostrato che l'alluminio 6061-T6 ha prestazioni termiche migliori grazie alla conducibilità termica e alla resistenza meccanica. I parametri del dissipatore di calore sono riportati nella Tabella 1.

Pupcevic et al. [2025] hanno condotto uno studio sperimentale su uno scambiatore di calore utilizzato negli elementi Peltier. Lo studio è stato condotto in condizioni naturali. La temperatura massima raggiunta è stata di 90 °C per una potenza elettrica di 9,026 W e 10 °C all'esterno. Gli autori hanno riportato che la distanza ottimale tra le alette è di 5,26 mm. I parametri del dissipatore di calore sono riportati nella Tabella 1.

La Tabella 1 mostra le dimensioni del dissipatore commerciale utilizzato dagli autori riportato nella revisione della letteratura.

## Scatola 1

**Tabella 1**

Parametri geometrici in mm

Caso	L	W	tb	N	H	t	P
Ventola et al. [2016]	21.8	41.4	8.4	14	21.8	1.0	2.1
Abdelmohimen et al. [2021]	40.0	39.7	5.0	10	20.0	1.0	3.3
Al-Luhaibi and Nazzal [2023]	100.0	55.0	12.0	8	28.0	1.0	2.5
Rodríguez-Muñoz et al. [2023]	32.0	52.0	2.0	11	20.0	2.0	3.0
Alomía [2025]	50.0	50.0	3.0	17	25.0	0.8	2.0
Pupcevic et al. [2025]	40.0	40.0	--	15	25.1	1.2	1.5

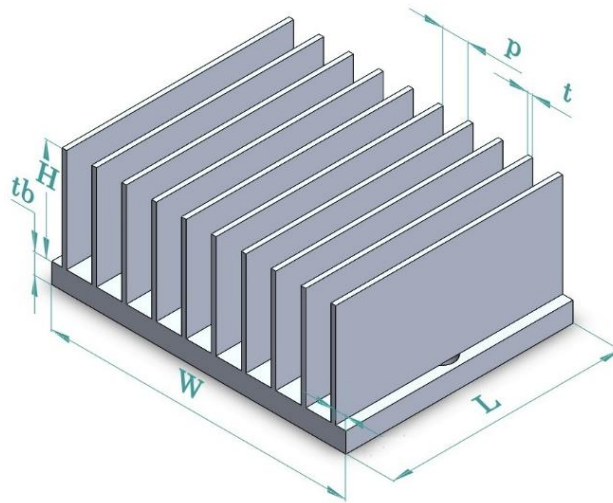
Fonte [elaborazione propria]

I parametri del dissipatore di calore sono riportati nella Tabella 1 in base alla Figura 1, dove è indicato ogni elemento. Questi parametri sono gli stessi sia per il dissipatore di calore sul lato freddo che su quello caldo.

Sebbene siano stati compiuti vari sforzi per migliorare l'efficienza del TEM, le informazioni su come lo spazio tra le alette e il trasferimento di calore convettivo interagiscono simultaneamente sono ancora limitate e, inoltre, questi studi non considerano l'effetto dello scambio di calore radiativo.

L'obiettivo principale di questo studio è analizzare le prestazioni termiche di un TEM commerciale con un modulo Peltier. L'analisi prende in considerazione 4 casi di separazione delle alette sul lato freddo e caldo e 6 casi di trasferimento di calore convettivo, nonché il trasferimento di calore radiativo nella superficie. Con quanto sopra, si cerca di identificare la configurazione migliore per le prestazioni del TEM in diverse condizioni di convezione.

## Scatola 2



**Figura 1**

Parametri di un dissipatore di calore

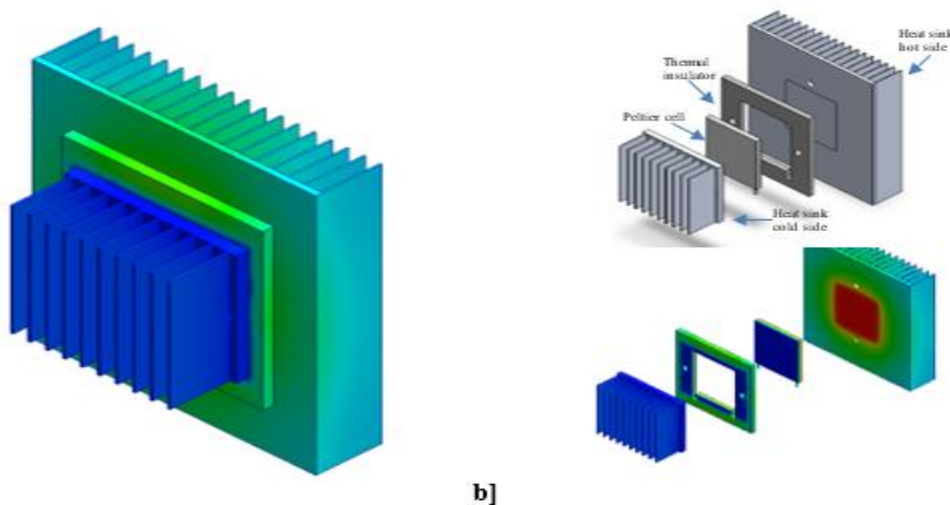
Fonte [elaborazione propria]

## 2. Materiali e metodi

### 2.1 Modulo termoelettrico commerciale

Il TEM analizzato si basa su un modello commerciale in alluminio comunemente utilizzato nelle applicazioni termoelettriche, come mostrato nella Figura 2. Il TEM ha un dissipatore di calore in lega di alluminio sul lato freddo con una base di 60 mm × 46 mm, un isolamento termico di 69 mm × 64 mm × 5 mm, una cella Peltier con dimensioni di 40 mm × 40 mm × 4 mm e un dissipatore di calore in lega di alluminio sul lato caldo con una base di 100 mm × 100 mm. Il design include alette parallele distribuite lungo la piastra di base. L'altezza del dissipatore di calore è H=20,83 mm per il lato freddo e H=20,57 mm per il lato caldo. La figura 2 mostra la configurazione del TEM analizzato. Sul lato sinistro a) il TEM è contratto e sul lato destro b) è espanso con i quattro elementi del TEM

## Scatola 3



a)

b)

**Figure 2**

Progettazione del TEM analizzato

Fonte [elaborazione propria]

## 2.2 Configurazione geometrica

I parametri del dissipatore di calore considerati in questo studio sono riportati nella Tabella 2. Sono stati analizzati quattro spazi tra le alette [valori di p nella Tabella 2] e l'altezza è stata mantenuta costante. Il numero di alette è regolato in base alla distanza tra le alette. Il caso C [C] si riferisce al lato freddo, il caso H [H] al lato caldo, mentre 1, 2, 3 e 4 si riferiscono a ciascun caso di p.

### Scatola 4

Tabella 2

Parametri geometrici in mm

Side	L	W	tb	N	H	T	P
C1	46	60	4.06	10	20.83	0.94	5.08
C2				13			3.81
C3				17			2.54
C4				27			1.27
H1	100	100	2.29	17	20.57	0.94	5.08
H2				21			3.81
H3				28			2.54
H4				44			1.27

Fonte [elaborazione propria]

## 2.3 Materiali

Il modulo Peltier ha considerato temperature di  $T_h=85\text{ °C}$  e  $T_c=12\text{ °C}$  rispettivamente sul lato caldo e freddo. Il dissipatore di calore è realizzato in alluminio [Al 6061] con una conducibilità termica di  $k=205\text{ W/[mK]}$ , una densità di  $2700\text{ kg/m}^3$  e una capacità termica specifica di  $896\text{ J/kgK}$ . Il dissipatore di calore in lega di alluminio perde energia per convezione e irraggiamento nell'ambiente a una temperatura di  $T_\infty=25\text{ °C}$ .

L'emissività considerata era 0,85 in base alle proprietà della superficie dell'alluminio riportate da Cengel & Ghajar [2011] con un fattore di vista di 0,5 dovuto alla configurazione dell'aletta parallela, il che significa che, sebbene gli studi riportino una bassa influenza del trasferimento di calore per irraggiamento, si è ritenuto opportuno effettuare una simulazione più realistica. I coefficienti di trasferimento di calore per convezione considerati sono stati 5, 20, 50, 100, 150 e  $200\text{ W/m}^2\text{ K}$ , ovvero dalla convezione naturale alla convezione forzata. Una resistenza termica distribuita per contatto tra la cella Peltier e l'isolamento termico e i dissipatori di calore di  $5 \times 10^{-6}\text{ Km}^2/\text{W}$ .

## 2.4 Modello matematico

Il modello matematico utilizzato in questo studio si basa sull'equazione energetica in condizioni stazionarie del trasferimento di calore per conduzione nel dominio solido. Questo è accoppiato con la convezione e la radiazione attraverso le superfici dei confini. L'equazione che governa la temperatura T è espressa come [Çengel & Ghajar, 2011 e Bergman et al., 2011]:

$$\nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{q} = 0 \quad [1]$$

Dove k è la conducibilità termica [W/mK] ed è la generazione di calore volumetrico [W/m<sup>3</sup>]. Poiché il dissipatore di calore non include una fonte interna, allora .

Il trasferimento di calore per convezione e irraggiamento al confine è dato rispettivamente dalle equazioni [2] e [3]:

$$\dot{q}_{\text{convezione}} = h(T_s - T_\infty) \quad [2]$$

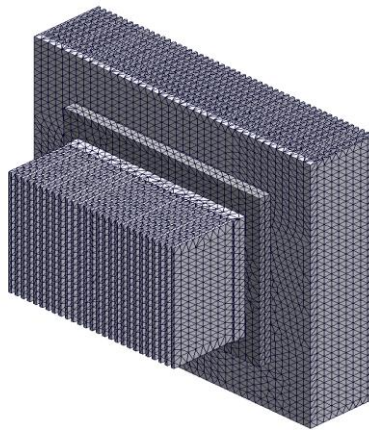
$$\dot{q}_{\text{radiazione}} = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_\infty^4) \quad [3]$$

Dove  $h$  è il coefficiente di trasferimento di calore convettivo [ $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ ] che vanno dalla convezione naturale [ $5 \text{ W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ ] alla convezione forzata [ $200 \text{ W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ ],  $T_s$  è la temperatura superficiale,  $T_\infty$  è la temperatura del fluido [aria],  $\epsilon$  è l'emissività della superficie [è stata considerata per questo studio  $\epsilon=0.85$ ],  $\sigma$  è la costante di Stefan-Boltzmann [ $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$ ]. Sono state considerate proprietà termofisiche costanti.

## 2.5 Configurazione numerica e condizioni al contorno

La simulazione termica in condizioni stazionarie è stata eseguita utilizzando il software Solid Works. Le equazioni che governano il sistema sono state risolte con il metodo degli elementi finiti, in cui l'equazione discretizzata è stata approssimata in ciascun elemento della griglia. L'indipendenza della mesh è stata verificata raffinando la griglia fino a ottenere una differenza di temperatura inferiore all'1%. Per le condizioni al contorno, è stata considerata una temperatura fissa nelle facce della cella Peltier [ $T_h=85^\circ\text{C}$  e  $T_c=12^\circ\text{C}$ ] e perdite di calore convettive e radiative nell'ambiente alla temperatura di  $T_a=T_y=25^\circ\text{C}$  con variazione del trasferimento di calore convettivo. È stata utilizzata una griglia standard fine con una tolleranza di 0,125 mm con 16 punti jacobiani; il caso con C1 e H1 ha utilizzato 76.001 elementi con 146.676 nodi e per il caso C4 e H4 sono stati utilizzati 170.438 elementi con 334.290 nodi. Gli elementi erano di ordine elevato. La figura 3 mostra la griglia per il caso C4 e H4.

### Scatola 5



**Figura 3**

Griglia utilizzata nel caso di C4 H4 per l'analisi termica.

Ogni configurazione è stata simulata nelle stesse condizioni per garantire un confronto coerente. I risultati ottenuti sono stati la distribuzione della temperatura e il gradiente di temperatura lungo la lunghezza delle alette sia sul lato caldo che su quello freddo.

I risultati sono stati analizzati per identificare in che modo lo spazio tra le alette e il trasferimento di calore convettivo influenzano il raffreddamento del dissipatore di calore del TEM.

## 3. Risultati e discussione

In questa sezione vengono presentati i risultati della simulazione numerica. Questi risultati sono importanti perché forniscono informazioni dettagliate sulla temperatura nelle alette del dissipatore di calore e, con i profili di temperatura, determinano quale sia la migliore configurazione studiata. La temperatura è stata calcolata nell'aletta centrale di ciascun dissipatore di calore per entrambi i lati [caldo e freddo] del TEM.

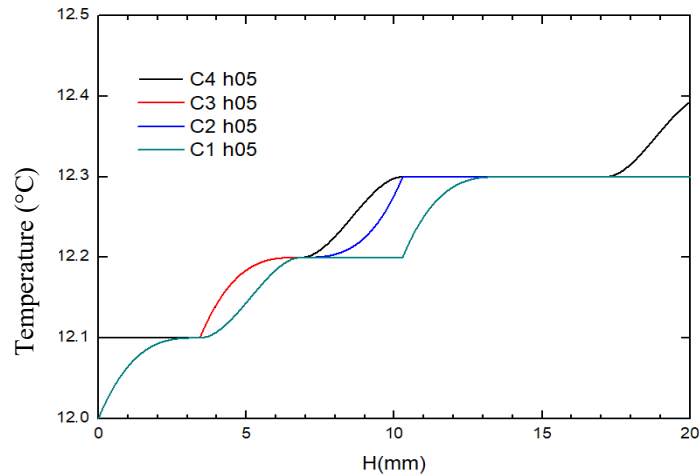
### 3.1 Effetto della spaziatura sul lato freddo

La figura 4 mostra la temperatura su un'aletta centrale del dissipatore di calore nella faccia fredda per  $h=5 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$  e i quattro casi di  $p$ . La temperatura aumenta allontanandosi dalla base del dissipatore di calore. Comportamento simile. Si osserva un gradiente di temperatura simile quando il trasferimento di calore per convezione naturale è presente in ciascun caso di  $C$ .

La differenza massima di temperatura presentata era  $DT=0,3 \text{ }^\circ\text{C}$  in ciascun caso.

Come si osserva, nel lato freddo domina il trasferimento di calore per conduzione, quindi la geometria del dissipatore di calore ha un'influenza trascurabile.

### Scatola 6



**Figura 4**

Profilo di temperatura per il caso di  $h=5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  e i quattro casi di  $p$  sul lato freddo del TEM.

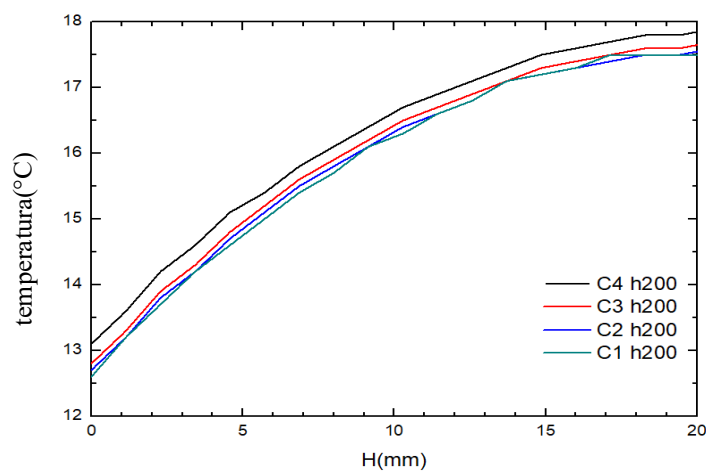
La figura 5 mostra la distribuzione della temperatura sul lato caldo del dissipatore di calore per diversi casi di coefficiente di trasferimento di calore convettivo. All'aumentare del trasferimento di calore convettivo a  $200 \text{ W/m}^2\text{K}$ , la temperatura nel dissipatore di calore sul lato freddo aumenta da  $12,5 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $17,8 \text{ }^\circ\text{C}$ , ovvero si verifica un gradiente di temperatura maggiore lungo l'aletta, in particolare vicino alla punta. Confrontando il comportamento termico di C2 rispetto a C1, C3 rispetto a C2 e C4 rispetto a C3, la temperatura media in ciascun caso è rispettivamente  $0,2$ ,  $0,1$  e  $0,1$ .

La temperatura media tra C4 e C1 è  $DT=0,4 \text{ }^\circ\text{C}$  e la differenza di temperatura massima tra il caso C4 e C1 è stata di  $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Sul lato freddo, il dissipatore di calore assorbe energia dall'ambiente. È chiaro che nei casi di convezione naturale la selezione di  $N$  non influisce sul comportamento termico del dissipatore di calore, con la conseguente possibilità che si verifichino condensazione e brina a bassa temperatura.

Nonostante l'aumento del trasferimento di calore convettivo a  $200 \text{ W/m}^2\text{K}$ , non vi è un gradiente di temperatura significativo tra i casi C1, C2, C3 e C4. La differenza principale è l'energia acquisita all'estremità dell'aletta. Questa energia riscalda le alette e può evitare la formazione di brina.

### Scatola 7



**Figura 5**

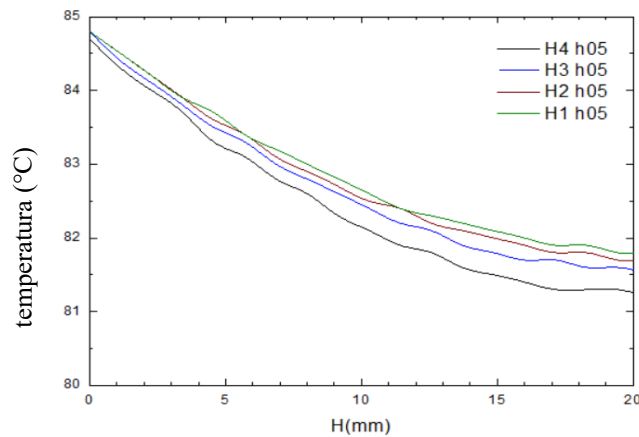
Profilo di temperatura per il caso di  $h=200 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  e i quattro casi di  $p$  sul lato freddo del TEM.

### 3.2 Effetto della spaziatura sul lato caldo

Per il lato caldo di un TEM, la Figura 6 confronta la temperatura in funzione della distanza tra le alette [da H1 a H4]. La figura mostra il comportamento termico dell'aletta centrale per  $h=5 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Come si può osservare, allontanandosi dalla base del dissipatore di calore, la temperatura diminuisce fino a  $81,2 \text{ }^\circ\text{C}$ , con una riduzione di  $3,8 \text{ }^\circ\text{C}$  nel caso della convezione naturale. All'aumentare del numero di alette, la temperatura diminuisce fino a  $0,6 \text{ }^\circ\text{C}$  nel caso di H4 rispetto a H1. Nonostante la riduzione della temperatura, tale diminuzione non è significativa.

Rispetto al lato freddo, si osserva un gradiente di temperatura più elevato tra la base e la punta dell'aletta a causa del gradiente di temperatura con l'aria. Il gradiente di temperatura più elevato favorisce la massima interazione del trasferimento di calore con le alette.

#### Scatola 8



**Figura 6**

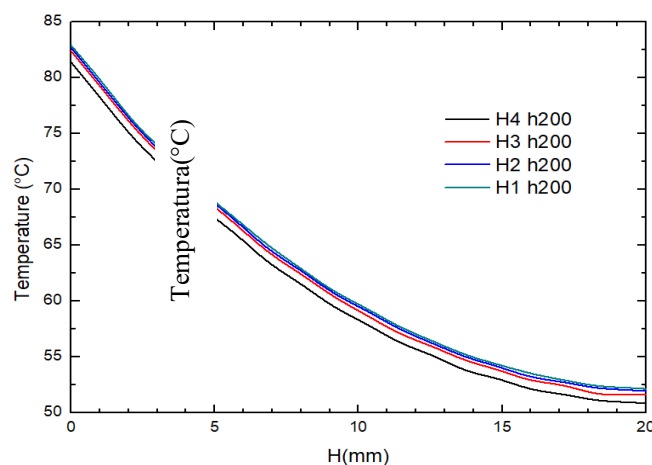
Profilo di temperatura per il caso di  $h=5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  e i quattro casi di  $p$  sul lato caldo del TEM.

*Fonte [elaborazione propria]*

La figura 7 mostra il comportamento termico dell'aletta centrale per  $h=200 \text{ W/m}^2\text{K}$  e le quattro configurazioni considerate. Si osserva che la temperatura diminuisce tra la base e la punta delle alette. Inoltre, si registra un aumento quando la distanza tra le alette si riduce fino a  $p=1,27 \text{ mm}$ .

Analogamente alla figura 5, si osserva una diminuzione della temperatura da  $81,4 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $51,5 \text{ }^\circ\text{C}$  nel caso di H4 [ $\Delta T=29,9 \text{ }^\circ\text{C}$ ]. La differenza di temperatura massima tra C1 e C4 è di  $1,6 \text{ }^\circ\text{C}$ . Si osserva che l'effetto della geometria è quasi trascurabile, tranne nel caso di H4, indicando che un aumento del numero di alette per la convezione forzata aumenta il trasferimento di calore convettivo nel trasferimento di calore complessivo.

#### Scatola 9



**Figura 7**

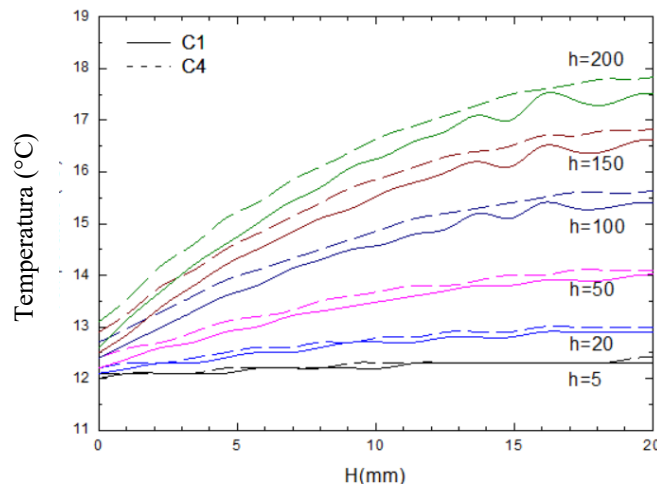
Profilo di temperatura per il caso di  $h=200 \text{ W/m}^2\text{K}$  e i quattro casi di  $p$  sul lato caldo del TEM.

### 3.3 Effetto del coefficiente di trasferimento termico convettivo sul lato freddo

La figura 8 mostra il comportamento termico del dissipatore di calore situato sul lato freddo. I valori sono stati ottenuti sulla aletta centrale per i casi C1 e C4, con trasferimento di calore convettivo da  $5 \text{ W/m}^2\text{K}$  a  $h=200 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Si osserva che per la convezione naturale,  $h=5 \text{ W/m}^2\text{K}$ , non vi sono gradienti di temperatura significativi [ $DT \gg 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ], come mostrato nella Figura 3. In questo caso, il trasferimento di calore per conduzione prevale su quello per convezione. All'aumentare di  $h$ , la temperatura aumenta all'estremità dell'aletta.

I casi con alette più alte perdono più energia rispetto a quelli con alette più basse, tuttavia la differenza di temperatura massima era di  $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$  per  $h=200 \text{ W/m}^2\text{K}$  per C4 rispetto a C1. Quindi,  $N$  non ha un effetto significativo sul lato freddo.

#### Scatola 10



**Figura 8**

Profilo della temperatura sul lato freddo per i casi C1 e C4 con la variazione del trasferimento di calore convettivo.

Fonte [elaborazione propria]

### 3.4 Effetto del coefficiente di trasferimento termico convettivo sul lato caldo

D'altra parte, la Figura 9 mostra il comportamento termico del dissipatore di calore situato sul lato caldo per i casi H1 e H4 a diversi valori di  $h$ . All'aumentare di  $h$ , la temperatura diminuisce in modo non lineare all'estremità dell'aletta. I casi con un numero maggiore di alette acquisiscono più energia dalla temperatura ambiente rispetto ai casi con meno alette; la differenza di temperatura massima era di  $1,5 \text{ }^\circ\text{C}$  per  $h=200 \text{ W/m}^2\text{K}$  per H4 rispetto a H1.

Con l'aumento di  $h$ , la temperatura all'estremità delle alette può diminuire di  $3^\circ$  per  $h=5 \text{ W/m}^2\text{K}$ , rispetto alla temperatura e alla base del dissipatore di calore, e per  $h=200 \text{ W/m}^2\text{K}$  questa temperatura si riduce fino a  $30,9^\circ\text{C}$ . Inoltre, si osserva che per valori elevati di  $h$  la curva diventa più ripida, il che si riflette in un tasso di trasferimento di calore più elevato.

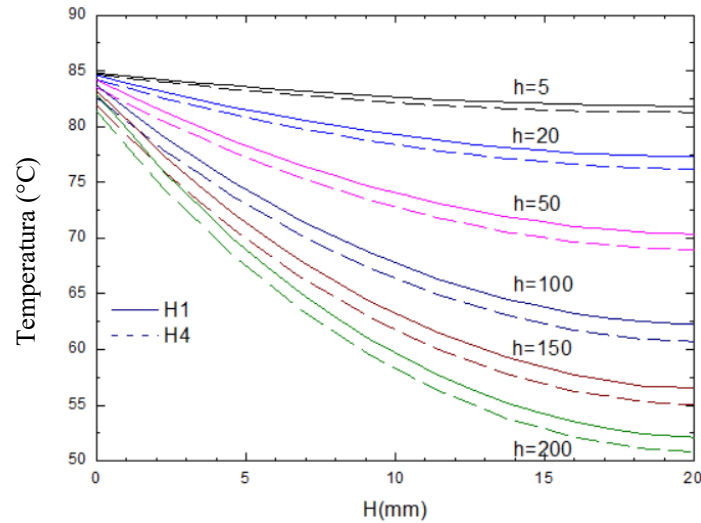
### 3.5 Discussione

L'analisi termica su TEM fornisce informazioni importanti relative all'effetto della distanza tra le alette e al trasferimento di calore convettivo sulle prestazioni complessive del sistema.

Per il lato caldo, i risultati mostrano che per la convezione naturale [ $h \leq 20 \text{ W/m}^2\text{K}$ ] la distribuzione della temperatura lungo l'aletta è quasi uniforme confrontando ciascuna configurazione [ $DT=0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ], in questo caso la conduzione domina il meccanismo di trasporto del trasferimento di calore.

Quando il trasferimento di calore convettivo aumenta [ $h \geq 100 \text{ W/m}^2\text{K}$ ], l'effetto dello spazio dell'aletta è significativo e si ottiene la temperatura più bassa, nel caso di  $p=1,28 \text{ mm}$  [H4], a causa dell'aumento dell'area di trasferimento del calore che favorisce il trasferimento di calore per convezione. Ciò è coerente con la relazione di Abdelmohimen et al. [2021] e Ventola et al. [2016].

## Scatola 11



**Figura 9**

Profilo della temperatura sul lato caldo per i casi C1 e C4 con la variazione del trasferimento di calore convettivo.

*Fonte [elaborazione propria]*

Tuttavia, sul lato freddo questo effetto è meno visibile, la variazione di temperatura tra la base dell'aletta e le estremità dell'aletta è di  $0,5\text{ °C}$  indipendentemente dallo spazio minimo o massimo tra le alette, quindi l'aumento del numero di alette non contribuisce al raffreddamento, in accordo con [Pupcevic et al. \[2025\]](#).

In conclusione, l'ottimizzazione del TEM deve concentrarsi sull'aumento del numero di alette sul lato caldo del TEM.

## 4. Conclusione

Questo studio ha presentato l'analisi termica nel dissipatore di calore utilizzato nel TEM commerciale. Sono stati considerati quattro casi di separazione delle alette sul lato freddo e sul lato caldo [ $p=5,08, 3,81, 2,54, 1,27\text{ mm}$ ]. Per il caso del trasferimento di calore convettivo, sono stati considerati 6 casi [ $h=5, 20, 50, 100, 150\text{ e }200\text{ W/m}^2\text{K}$ ].

La simulazione è stata effettuata con Solid Works. L'analisi termica è stata effettuata sull'aletta centrale.

Dall'analisi è emerso che:

1. Sul lato freddo del TEM, per  $h=5\text{ W/m}^2\text{K}$ , non vi è una differenza significativa con il numero di alette utilizzate, la differenza massima di temperatura era di  $0,3\text{ °C}$ .
2. Sul lato freddo per  $h=200\text{ W/m}^2\text{K}$ , il C4 può aumentare la temperatura del dissipatore di calore perché ha una superficie di trasferimento del calore maggiore.
3. Sul lato caldo, la temperatura diminuisce all'aumentare del numero di alette di  $0,6\text{ °C}$  per  $h=5\text{ W/m}^2\text{K}$ . La temperatura diminuisce da  $84,8\text{ °C}$  alla base del dissipatore di calore a  $81,2\text{ °C}$  all'estremità dell'aletta.
4. Quando  $h=200\text{ W/m}^2\text{K}$ , la temperatura diminuisce da  $82,4\text{ °C}$  a  $50,7\text{ °C}$  all'estremità dell'aletta.
5. La scelta del dissipatore di calore sul lato freddo dipende dall'applicazione per selezionare il numero adeguato di alette.

Per il lato caldo, si consiglia un dissipatore di calore con 44 alette.

I risultati sono in accordo con gli studi riportati in letteratura, quindi la geometria e il trasferimento di calore convettivo giocano un ruolo importante nella dissipazione del calore sul lato caldo, in contrasto con il lato freddo che rimane quasi alla stessa temperatura.

## Dichiarazioni

### Conflitto di interessi

Gli autori dichiarano di non avere alcun conflitto di interessi. Non hanno interessi finanziari concorrenti noti o relazioni personali che potrebbero aver influenzato l'articolo riportato in questo articolo.

### Contributo degli autori

*Alvarado-Juárez, Roberto*: ha contribuito con l'idea principale, l'analisi dei dati e la trascrizione.

*Rivera-Hernández, David Antonio*: ha contribuito con lo studio di simulazione e la progettazione.

*Guzmán-Cortes, Jhonatan Alberto*: ha contribuito con lo studio di simulazione e la progettazione.

*Rodríguez-Brito, Diana Isabel*: ha contribuito alla revisione delle informazioni e all'analisi dei dati.

### Disponibilità di dati e materiali

I dati ottenuti in questo studio sono disponibili su richiesta all'autore corrispondente.

### Finanziamenti

La ricerca non ha ricevuto alcun finanziamento.

### Ringraziamenti

Gli autori ringraziano l'Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz per le strutture messe a disposizione per lo sviluppo di questo studio.

## ABBREVIAZIONI

A	Superficie [m <sup>2</sup> ]
Case C	Lato freddo del case
Case H	Lato caldo del case
H	Distanza tra le alette [mm]
h	Coefficiente di trasferimento termico convettivo [W/m <sup>2</sup> K]
	Conducibilità termica [W/mK]
k	Lunghezza delle alette [mm]
L	Numero di alette
N	Trasferimento termico convettivo [W/m <sup>2</sup> ]
$\dot{q}_{\text{convezione}}$	Trasferimento termico radiante [W/m <sup>2</sup> ]
$\dot{q}_{\text{radiazione}}$	Altezza delle alette [mm]
p	Spessore delle alette [mm]
t	Spessore della piastra di base [mm]
tb	Temperatura fredda [°C]
T <sub>c</sub>	Temperatura calda [°C]
T <sub>h</sub>	Temperatura superficiale [°C]
T <sub>s</sub>	Temperatura ambiente [°C]
T <sub>∞</sub>	Modulo termoelettrico
TEM	Larghezza della piastra di base [mm]
W	Emissività
ε	Operatore differenziale [Nabla]
∇	Costante di Stefan-Boltzmann
σ	[5.6707×10 <sup>-8</sup> W/m <sup>2</sup> ·K <sup>4</sup> ]

## Riferimenti

### Contesto

Hájovský, R., Pieš, M., & Richtár, L. [2016]. [Analysis of the appropriateness of the use of Peltier cells as energy sources](#). *Sensors*, 16[6], 760.

Nasri, W., Djebali, R., Dhaoui, S., Abboudi, S., & Kharroubi, H. [2017]. [Finite elements multiphysics investigation of thermoelectric systems for electricity and cooling generation](#). *International Journal of Modern Studies in Mechanical Engineering* 3[4], 1-13.

Korprasertsak, N., & Leephakpreeda, T. [2016]. [Mathematical modeling and validation of cooling/heating effects in thermoelectric module coupled with heat sinks](#). *7th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering [ICMAE]*, London, UK, pp. 95-99

Shate, A. & Sanap, S. [2019]. [Augmentation of thermal performance of plate fin heat sink](#). *International Journal of Engineering and Advanced Technology* 8 [6S], 1087-1094.

### Nozioni di base

Al-Luhaibi, R.A., & Nazzal, I.T. [2023]. [Investigation of heat sinks with different perforation patterns](#). *International Journal of Heat and Technology*, 41[5], 1195-1204.

Alomía-Sandoval, S. D. [2025]. [Diseño y simulación de la configuración de aletas para el proceso de disipación de calor mediante software especializado](#) [Master thesis, Universidad Politécnica Salesiana]. Institutional repository.

Kudva, N., Veerasha, R.K. & Muralidhara, [2020]. [A review on thermoelectric \[Peltier\] module](#). *International Journal of Progressive Research in Science and Engineering* 1[4] 212-216.

Li, C., Luo, Y., Li, W., Yang, B., Sun, C., Ma, W., Ma, Z., Wei, Y., Li, X. & Yans., J. [2024]. [The on-chip thermoelectric cooler: advances, applications and challenges](#). *Chip* 3[2] 100096.

Shilpa, M.K., Abdul Raheman, M., Aabid, A., Baig, M., Veerasha, R.K. et al. [2023]. [A Systematic Review of Thermoelectric Peltier Devices: Applications and Limitations](#). *Fluid Dynamics & Materials Processing*, 19[1], 187–206.

### Supporti

Çengel, Y.A. & Ghajar, A.J. [2011], [Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications](#) [4a ed.]. McGraw-Hill Higher Education.

Bergman, T.L., Lavine, A.S., Incropera, F.P. & Dewitt, D.P. [2011]. [Fundamentals of Heat and Mass Transfer](#). Wiley.

### Differenze

Rodríguez Muñoz, J. L., Peña Hernández, L. A., Pacheco Cedeño, J. S., Ramírez Minguela, J. de J., & Balcázar García, J. G. [2023]. [Análisis térmico de disipadores de calor en SolidWorks empleando diferentes configuraciones de aletas](#). *Ingenio Y Conciencia Boletín Científico De La Escuela Superior Ciudad Sahagún*, 10[20], 47–55.

### Discussioni

Ventola, L., Curcuruto, G., Fasano, M., Fotia, S., Pugliese, V., Chiavazzo, E., & Asinari, P. [2016]. [Unshrouded plate fin heat sinks for electronics cooling: validation of a comprehensive thermal model and cost optimization in semi-active configuration](#). *Energies*. 9 [8], 608.

Abdelmohimen, M.A.H., Almutairi, K., Elkotb, M.A., Abdelrahman, H.E., & Algarni, S. [2021]. Numerical investigation of using different arrangement of fin slides on the plate-fin heat sink performance. *Thermal Science*. 5[6], 4683-4693.

Pupcevic, M.B., Gvero, P., Zeljkovic, C., Kotur, M., Mrsic, P., & Tesic, S. [2025]. Optimization and experimental validation of a natural convection space heater using the Peltier elements. *Thermal Science*. 29[3], 2141-2153.