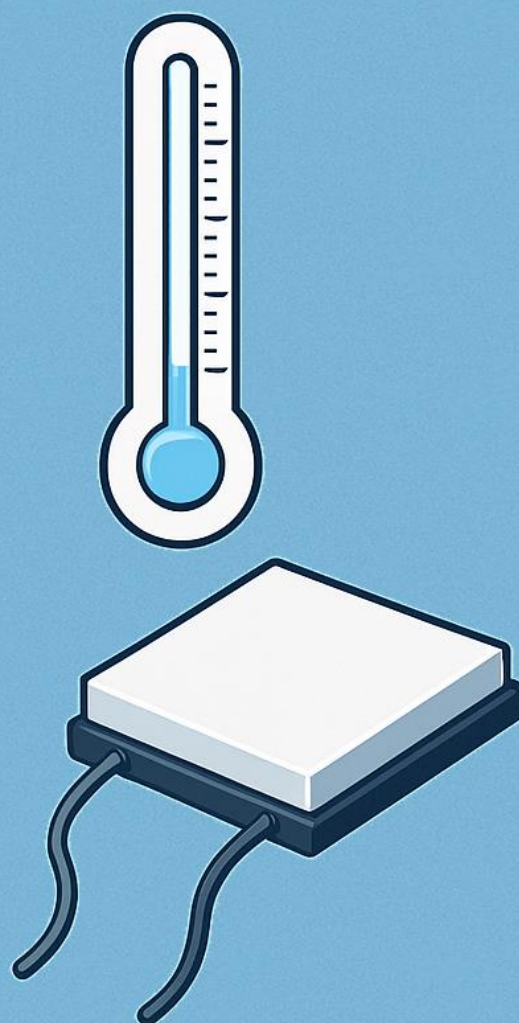
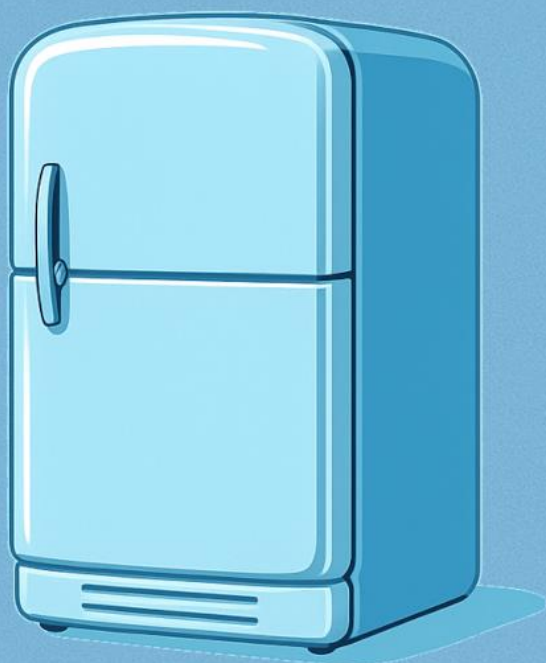


IL FRIGORIFERO TASCABILE: SEGRETI E SIMULAZIONI DELLE CELLE DI PELTIER



Leonardo Chieco

Il frigorifero tascabile

Segreti e simulazioni delle celle di Peltier

Avete mai visto quei piccoli moduli bianchi, grandi quanto una moneta, capaci di produrre freddo da un lato e caldo dall'altro semplicemente collegandoli a una batteria? Sono le **celle di Peltier**, dispositivi termoelettrici che trasformano direttamente l'elettricità in un gradiente di temperatura. Le trovate nei mini-frigoriferi da campeggio, nei sistemi di raffreddamento per elettronica, persino nei dispositivi medicali portatili.

Ma come funzionano davvero? Quali leggi della fisica si nascondono dietro questo effetto? E, soprattutto, come si possono **modellare e simulare** per integrarle in un progetto elettronico con controllori PI o PID?

In questo tutorial vi guiderò passo dopo passo: partiremo dai principi di base e costruiremo un **modello SPICE** per capire come si comporta una cella di Peltier quando viene sottoposta a disturbi termici o pilotata con un regolatore elettronico.

Alla fine, scoprirete che dietro a questo “frigorifero tascabile” non c'è magia, ma una combinazione elegante di fisica, elettronica e controllo automatico.

Buona lettura!

L'autore

Leonardo Chieco è un ingegnere elettronico con oltre 20 anni di esperienza nella progettazione e sviluppo di software per il controllo dell'automazione (PC/PLC), nella progettazione di schede elettroniche per applicazioni industriali, firmware, robotica e mecatronica.

LinkedIn: <https://www.linkedin.com/in/leonardo-chieco-53550b129/>

1. Introduzione

Le celle di Peltier, spesso chiamate anche moduli termoelettrici, sono dispositivi a stato solido in grado di trasferire calore da una superficie all'altra quando attraversati da una corrente elettrica. La loro caratteristica principale è quella di poter generare un gradiente di temperatura senza l'impiego di fluidi refrigeranti, compressori o parti meccaniche in movimento.

Per questo motivo trovano ampio impiego in applicazioni dove compattezza, silenziosità e assenza di manutenzione sono fondamentali: piccoli frigoriferi portatili, raffreddamento di componenti elettronici sensibili (come sensori CCD o laser), climatizzazione di sedili automobilistici, ma anche in ambito industriale e scientifico, ad esempio nei sistemi di stabilizzazione termica di strumenti di misura.

Al contrario dei sistemi tradizionali di refrigerazione, la cella di Peltier non è molto efficiente dal punto di vista energetico; tuttavia, la sua semplicità e la possibilità di controllo elettronico preciso la rendono spesso la soluzione preferita in applicazioni di nicchia.

2. Principio fisico di funzionamento e tensione di Seebeck

Il cuore del funzionamento di una cella di Peltier risiede nei **fenomeni termoelettrici**, cioè in quelle interazioni tra energia elettrica e calore che si manifestano nei materiali conduttori e semiconduttori. Per capire davvero cosa accade all'interno di un modulo Peltier è utile partire dalle basi, distinguendo i tre effetti che ne descrivono il comportamento: **Seebeck**, **Peltier** e **Thomson**. Questi tre fenomeni furono osservati in epoche diverse da fisici come Thomas Seebeck (1821), Jean-Charles Peltier (1834) e William Thomson, noto anche come Lord Kelvin (1854).

L'effetto Seebeck

L'effetto Seebeck si manifesta quando due conduttori o semiconduttori diversi vengono uniti a formare un circuito chiuso e le giunzioni si trovano a temperature differenti. In questa condizione si genera una differenza di potenziale elettrico che può essere misurata ai capi del circuito. In termini pratici, significa che il **gradiente termico** viene **convertito** direttamente in **energia elettrica**.

Il coefficiente che quantifica questo fenomeno è chiamato **coefficiente di Seebeck (S)**, espresso in microvolt per Kelvin ($\mu\text{V/K}$). Il valore di S dipende fortemente dal materiale: nei metalli comuni è molto piccolo (pochi $\mu\text{V/K}$), mentre nei semiconduttori può raggiungere valori anche cento volte superiori, rendendoli molto più interessanti per applicazioni termoelettriche.

L'equazione che descrive l'effetto Seebeck è:

$$V = S \cdot \Delta T$$

dove:

- V è la differenza di potenziale elettrico generata,
- S è il coefficiente di Seebeck del materiale,
- ΔT è la differenza di temperatura tra le due giunzioni.

Questo fenomeno è alla base delle **termocoppie**, strumenti largamente usati per misurare temperature in ambito industriale, proprio perché trasformano direttamente un gradiente termico in un segnale elettrico.

L'effetto Peltier

Se l'effetto Seebeck descrive la conversione di calore in elettricità, l'effetto Peltier rappresenta il processo inverso: se si fa passare una corrente attraverso la giunzione di due materiali differenti, si ha un trasferimento di calore che porta una delle giunzioni a raffreddarsi e l'altra a riscaldarsi.

In termini microscopici, questo fenomeno può essere spiegato osservando il comportamento dei **portatori di carica** (elettroni nei semiconduttori di tipo n, lacune nei semiconduttori di tipo p). Quando questi portatori attraversano una giunzione, devono adattarsi a una nuova configurazione energetica: questo comporta un assorbimento o una cessione di energia termica all'ambiente circostante. Il calore assorbito o rilasciato per unità di tempo può essere espresso come:

$$Q = \Pi \cdot I$$

dove:

- Q è il flusso termico,
- Π è il coefficiente di Peltier (misurato in volt),
- I è la corrente che attraversa la giunzione.

Da questa relazione si nota subito che il fenomeno è **reversibile**: invertendo la direzione della corrente si invertono i ruoli delle giunzioni, e quindi il lato che si raffredda diventa quello che si scalda, e viceversa.

L'effetto Thomson

L'effetto Thomson, meno conosciuto ma importante a livello teorico.

Quando un conduttore omogeneo (per esempio un filo metallico o un semiconduttore) è percorso da una corrente elettrica e contemporaneamente è

soggetto a un **gradiente di temperatura** lungo la sua lunghezza, si verifica un trasferimento di calore addizionale.

Questo calore non è dovuto alle normali perdite Joule (che dipendono da $I^2 R$), bensì da un meccanismo reversibile legato all'interazione tra i portatori di carica e la variazione di energia disponibile lungo il conduttore.

In pratica, se i portatori di carica si muovono da una regione più calda a una più fredda, possono cedere energia al reticolo e liberare calore; se invece si muovono da freddo a caldo, assorbono energia, producendo un raffreddamento.

L'effetto Thomson viene quantificato con la relazione:

$$q = \tau \cdot I \cdot \frac{dT}{dx}$$

dove:

- q è la potenza termica (W) generata o assorbita lungo l'elemento,
- τ è il **coefficiente di Thomson** del materiale (in volt per kelvin),
- I è la corrente elettrica che attraversa il conduttore (A),
- $\frac{dT}{dx}$ è il gradiente di temperatura lungo la direzione del flusso di corrente (K/m).

È importante distinguere bene l'effetto Thomson dalle perdite Joule:

- **Joule**: sempre positivo, irreversibile, proporzionale a $R \cdot I^2$ e si manifesta anche in assenza di gradiente termico.
- **Thomson**: reversibile, proporzionale a I e a $\frac{dT}{dx}$, e si manifesta **solo** in presenza di un gradiente di temperatura.

L'effetto Thomson non è un fenomeno isolato, ma è legato agli altri due attraverso le **relazioni di Kelvin**:

$$\tau = T \cdot \frac{dS}{dT} \qquad \Pi = S \cdot T$$

dove:

- Π è il coefficiente di Peltier,
- S è il coefficiente di Seebeck,
- T è la temperatura assoluta.
- τ è il coefficiente di Thomson

Queste equazioni mostrano che i tre effetti non sono indipendenti, ma tre facce dello stesso fenomeno termoelettrico. In particolare, il coefficiente di Thomson è legato alla **variazione del coefficiente di Seebeck con la temperatura**.

Nelle applicazioni comuni (celle di Peltier, termocoppie, generatori termoelettrici), l'effetto Thomson è spesso trascurato nei modelli semplificati perché il suo contributo è relativamente piccolo. Tuttavia, in dispositivi ad alta precisione o ad alte temperature, diventa necessario considerarlo per una descrizione accurata delle prestazioni.

Struttura fisica di una cella di Peltier

Un modulo Peltier reale non si limita a una sola giunzione, ma è composto da **decine o centinaia di coppie di semiconduttori** di tipo p e n, collegati elettricamente in serie e termicamente in parallelo. In questo modo si ottiene una tensione complessiva più alta e una capacità di trasferimento termico significativa.

Le coppie di semiconduttori sono realizzate solitamente in **tellururo di bismuto (Bi₂Te₃)**, materiale con un elevato coefficiente di Seebeck e buona conducibilità elettrica. Questi elementi vengono montati tra due sottili piastre di ceramica, che garantiscono rigidità meccanica, isolamento elettrico e buona conducibilità termica.

Quando la **corrente scorre** lungo la serie di giunzioni, un lato del modulo diventa freddo mentre l'altro diventa caldo. La differenza di temperatura massima raggiungibile (ΔT_{max}) dipende dalla qualità del modulo, dalla corrente applicata e, soprattutto, dalla capacità di dissipazione del lato caldo.

La tensione di Seebeck non è solo un concetto teorico legato alle termocoppie, ma ha un ruolo diretto anche nelle celle di Peltier. Infatti, ogni coppia di semiconduttori p-n attraversata da un gradiente termico genera a sua volta una tensione Seebeck. Nel funzionamento come refrigeratore, questa tensione tende a **contrastare** la corrente imposta dall'alimentazione esterna, riducendo l'efficienza complessiva del modulo.

Per questo motivo, il comportamento di una cella Peltier può essere descritto con un modello elettrico equivalente che comprende:

- una sorgente di tensione proporzionale al gradiente termico (effetto Seebeck),
- una resistenza interna che rappresenta le perdite ohmiche,
- una sorgente di calore proporzionale alla corrente (effetto Peltier).

Questa rappresentazione è molto utile per i progettisti, perché permette di calcolare le prestazioni termiche della cella conoscendo i parametri elettrici.

Un aspetto cruciale da comprendere è che le celle di Peltier **non** sono particolarmente efficienti. La loro efficienza termodinamica è molto inferiore rispetto ai cicli frigoriferi tradizionali, e tipicamente si attesta intorno al **5–10%**. Tuttavia, la totale assenza di parti meccaniche in movimento, la silenziosità e la possibilità di un controllo elettronico preciso rendono questi dispositivi estremamente attraenti in molti ambiti applicativi.

Celle commerciali

In commercio è possibile trovare tantissime celle con dimensioni e potenze per ogni applicazione. I parametri più importanti di una **cella di Peltier (TEC – Thermoelectric Cooler)** dipendono sia dall'aspetto elettrico che da quello termico. Vediamoli in dettaglio:

- **Tensione nominale (V):** è la tensione alla quale la cella lavora in condizioni ottimali.

- **Corrente massima (I_{max}):** la corrente che può scorrere senza danneggiare le giunzioni; spesso coincide con quella usata per ottenere il massimo ΔT .
- **Resistenza interna (R_{int}):** resistenza elettrica della cella, utile per calcolare la potenza dissipata in calore $P=I^2 \cdot R$.
- **ΔT_{max} (differenza di temperatura massima):** è la differenza massima ottenibile tra lato caldo e lato freddo, misurata in $^{\circ}C$, a carico nullo (senza dissipare calore dal lato freddo).
- **Q_{max} (capacità di pompaggio termico):** quantità massima di calore (in Watt) che la cella può trasferire dal lato freddo a quello caldo, in genere specificata a $\Delta T \approx 0^{\circ}C$.
- **Temperatura di esercizio (T_{max} hot side):** temperatura massima ammissibile sul lato caldo, oltre la quale la cella rischia di danneggiarsi.
- **Coppia Q vs ΔT :** curva caratteristica che mostra come il calore pompato diminuisce all'aumentare della differenza di temperatura.

A titolo di esempio di riportano le caratteristiche salienti del modulo ADV-031-14-16-E-C2 della Adaptive.

Delta T a 300K	[$^{\circ}C$]	70
V_{MAX}	[V]	4.0
I_{MAX}	[A]	6.2
Q_{MAX} Termica	[W]	13.7
T_{MAX} Lato Caldo	[$^{\circ}C$]	90

Per maggiori informazioni si rimanda al datasheet del costruttore.

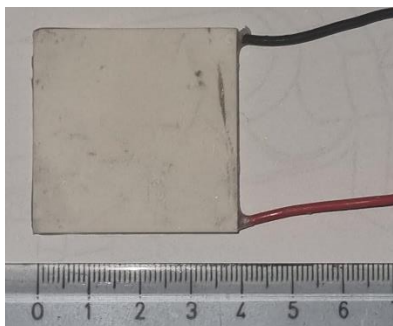


Figura 1: Cella di Peltier

NOTA: Il valore di ΔT_{\max} (la differenza di temperatura massima che una singola cella di Peltier può generare tra lato caldo e lato freddo) è una caratteristica intrinseca della cella e rimane pressoché costante.

Per questo motivo, se si desidera ottenere una differenza di temperatura più elevata rispetto a quella raggiungibile da una singola cella, è possibile **impilare più celle in serie termica**: il lato freddo della prima cella viene raffreddato ulteriormente da una seconda cella posta sopra, e così via.

In questo modo, la differenza di temperatura complessiva tra il lato caldo della cella più in basso e il lato freddo della cella più in alto diventa **la somma dei ΔT generati da ciascuna cella**.

Naturalmente, questo approccio ha delle conseguenze:

- aumenta la potenza elettrica richiesta;
- diminuisce l'efficienza complessiva (il COP cala);
- diventa molto più critica la dissipazione del calore sul lato caldo, perché ogni cella deve smaltire non solo il calore pompato dal lato freddo ma anche il calore generato elettricamente.

Il Coefficient of Performance COP è un indice di **efficienza** molto usato per celle di Peltier, pompe di calore e frigoriferi ed è il rapporto tra Q_c = calore pompato dal lato freddo al lato caldo (W) e P_{in} = potenza elettrica assorbita dalla cella (W).

Facciamo un esempio con un modulo tipo **TEC1-12706** (valori tipici): $\Delta T_{\max} \approx 65$ °C, $Q_{\max} \approx 60$ W.

Supponiamo di lavorare in un punto “moderato”: **$\Delta T \approx 30$ °C per stadio** con **COP $\approx 0,4$** . Il carico reale da raffreddare (calore da assorbire) sul lato freddo: **$Q_{c,carico} = 5$ W**.

Naturalmente per ciascuno stadio vale $Q_h = Q_c + P_{in}$. Il calore in uscita dallo stadio precedente diventa il carico Q_c dello stadio successivo. Q_h è la somma del calore sottratto al lato freddo più il calore generato dalla resistenza interna della cella (effetto Joule), quindi è sempre maggiore di Q_c , ovvero il calore assorbito dal **lato freddo**.

1 stadio (ΔT totale ≈ 30 °C)

- **Stadio 1 (più freddo):**
 $Q_{c1}=5$ W
 $P_{in1}=5/0,4=12,5$ W
 $Q_{h1}=5+12,5=17,5$ W da smaltire
- **Potenza elettrica totale: 12,5 W**

2 stadio (ΔT totale ≈ 60 °C)

- $Q_{c2} = Q_{h1} = 17,5$ W
 $P_{in2} = 17,5/0,4 = 43,75$ W
 $Q_{h2} = 17,5+43,75 = 61,25$ W da smaltire
- **Potenza elettrica totale: 12,5+43,75=56,25 W**

3 stadio (ΔT totale ≈ 90 °C)

- $Q_{c3} = Q_{h2} = 61,25$ W
 $P_{in3} = 61,25/0,4 = 153,125$ W
 $Q_{h3} = 61,25+153,125 = 214,375$ da smaltire
- **Potenza elettrica totale: 12,5+43,75+153,125 \approx 209 W**

Come possiamo osservare, i vari **ΔT** si sommano, ma la **potenza elettrica** e il **calore da smaltire sul lato caldo crescono rapidamente**. Già con 3 stadi per un carico di soli 5 W servirebbe un dissipatore capace di smaltire **almeno 200 W** e moduli inferiori molto vicini ai loro limiti: nella pratica, oltre 2 stadi si lavora con **carichi termici molto piccoli ($\leq 1-2$ W)** o con **stadi inferiori più robusti** e dotati di dissipazione forzata importante (es. ventole).

Notiamo che **Q_h è il parametro più critico** per il dimensionamento del dissipatore lato caldo. Se il dissipatore non riesce a smaltire tutto il calore Q_h , la temperatura del lato caldo sale, la cella perde efficienza e rischia di danneggiarsi.

3. Come si alimenta una cella di Peltier

Per funzionare, la cella di Peltier richiede un'alimentazione in **corrente continua**. La direzione della corrente determina quale lato si raffredda e quale si scalda, rendendo possibile anche l'inversione del ciclo termico semplicemente invertendo la polarità.

I parametri principali da considerare nell'alimentazione sono:

- **Corrente nominale:** indica la corrente ottimale per cui la cella garantisce le prestazioni dichiarate.
- **Tensione nominale:** tipicamente compresa tra 5 e 15 V per i moduli più comuni.
- **Potenza assorbita:** spesso elevata (decine di watt), con conseguente necessità di dissipatori e ventilazione sul lato caldo per garantire lo smaltimento del calore.

Un aspetto critico è che l'efficienza della cella diminuisce rapidamente se il calore non viene adeguatamente rimosso dal lato caldo: un sistema di dissipazione termica ben progettato è quindi essenziale.

Una cella di Peltier è, dal punto di vista elettrico, assimilabile a una **resistenza** con una certa **forza elettromotrice interna** legata all'effetto Seebeck. Questo significa che:

- il calore pompato dalla cella è **proporzionale alla corrente** che la attraversa ($Q = \Pi \cdot I$),
- la potenza dissipata per effetto Joule è proporzionale a $I^2 R$.

Ne consegue che il **parametro critico** da controllare per determinare la quantità di calore trasferita (e quindi la differenza di temperatura ottenibile) non è la tensione applicata, ma la **corrente**.

L'effetto Peltier è lineare con la corrente: se la corrente raddoppia, anche la quantità di calore trasferita raddoppia (entro i limiti operativi del dispositivo).

Al contrario, la tensione non è un parametro indipendente, perché è legata a corrente e resistenza interna dalla legge di Ohm:

$$V = I \cdot R + S \cdot \Delta T$$

Quindi alimentando in **tensione fissa**, la corrente effettiva varia in funzione della resistenza elettrica (che cambia con la temperatura) e della tensione di Seebeck generata dalla cella. Il risultato è che il comportamento della cella diventa meno prevedibile e instabile. In pratica, se una cella è alimentata a tensione costante, all'aumentare della temperatura interna la sua resistenza cresce quindi la corrente diminuisce e con essa anche il raffreddamento.

Con un'alimentazione **a corrente controllata**, invece, il flusso termico resta proporzionale al valore impostato, garantendo un controllo molto più preciso.

Le celle di Peltier sono dispositivi relativamente delicati: se percorse da una corrente eccessiva, si surriscaldano e si danneggiano in modo irreversibile. Un driver a **corrente costante** permette di fissare un limite massimo, proteggendo il modulo anche in condizioni anomale (per esempio se il dissipatore lato caldo non funziona correttamente).

4. Modello matematico della cella di Peltier

La simulazione delle celle di Peltier è fondamentale per progettare sistemi termoelettrici efficienti, affidabili e sicuri. Sebbene questi dispositivi siano relativamente compatti e privi di parti meccaniche in movimento, il loro comportamento termico-elettrico è complesso e non lineare: il calore trasferito dipende direttamente dalla corrente applicata, dalla differenza di temperatura tra lato caldo e lato freddo e dalle proprietà dei materiali semiconduttori, mentre la resistenza interna e la tensione di Seebeck variano con la temperatura. Senza simulazione, sarebbe necessario ricorrere a numerosi prototipi fisici, con costi elevati e tempi lunghi, per verificare le prestazioni e la stabilità termica.

Attraverso modelli simulativi, è possibile valutare in dettaglio fenomeni complessi come l'effetto della dissipazione termica sul lato caldo e ottimizzare il controllo elettronico della corrente applicata alla cella di Peltier. In particolare, la simulazione consente di integrare facilmente le celle all'interno di circuiti di controllo PI o PID, prevedendo con precisione la risposta dinamica a variazioni di carico o modifiche del setpoint. L'approccio basato sulle analogie elettriche permette inoltre di sfruttare strumenti di simulazione consolidati, come LTSpice, riducendo significativamente il rischio di danneggiamento dei moduli durante i test fisici e accelerando le fasi di progettazione e validazione.

In letteratura sono disponibili diversi modelli matematici per le celle di Peltier, con livelli di complessità e accuratezza crescenti. Per questo tutorial, mi sono basato sul lavoro "SPICE model of thermoelectric elements including thermal effects" [1], che propone un modello elettrico SPICE per una cella Peltier costruito sfruttando analogie consolidate tra fenomeni termici ed elettrici. Grazie a queste analogie, grandezze come il flusso di calore, la capacità termica e la resistenza termica possono essere rappresentate con elementi circuitali equivalenti (resistenze, capacità, sorgenti di tensione), permettendo di analizzare in modo semplice e accurato sia il comportamento termico della cella, sia la sua integrazione nei circuiti di controllo.

Concetto termico	Analogico elettrico
Temperatura	Tensione
Flusso di calore	Corrente elettrica
Resistenza termica	Resistenza elettrica
Capacità termica	Capacità elettrica

Il modello proposto, visibile nella figura seguente, traduce i principali effetti (Seebeck, Peltier, Joule, conduzione termica) in un circuito equivalente SPICE. In questo modo, la simulazione di celle Peltier diventa immediata anche utilizzando strumenti nati per studiare circuiti elettronici.

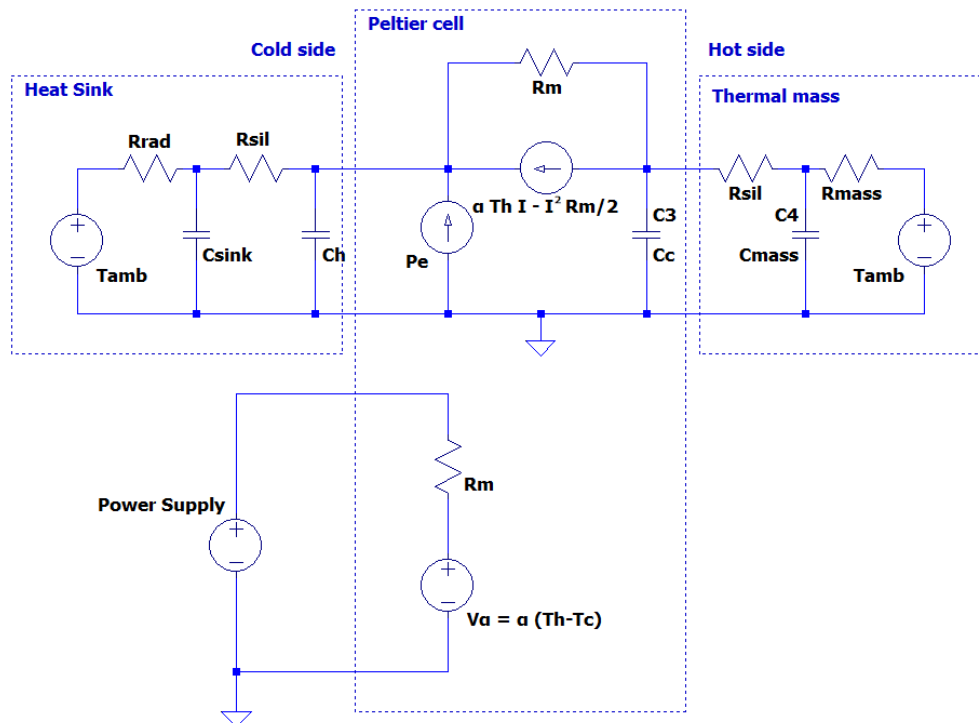


Figura 2: Modello della cella di Peltier proposto da [1]

Dove:

- R_{rad} è la resistenza termica del dissipatore (heat sink): 0.34 K/W,
- R_{mass} è la resistenza termica della massa che colleghiamo alla cella, sul lato freddo : 3.1 K/W,

- R_{sil} è la resistenza termica del silicone interposto tra TEC e massa termica e tra TEC e dissipatore: 0.143 K/W,
- C_{rad} è la capacità termica del dissipatore: 340 J/K,
- C_{mass} è la capacità termica della massa: 304 J/K,
- R_m è la resistenza interna della cella: 1.806 ohm,
- P_e : potenza elettrica assorbita,
- T_{amb} è la temperatura ambiente.

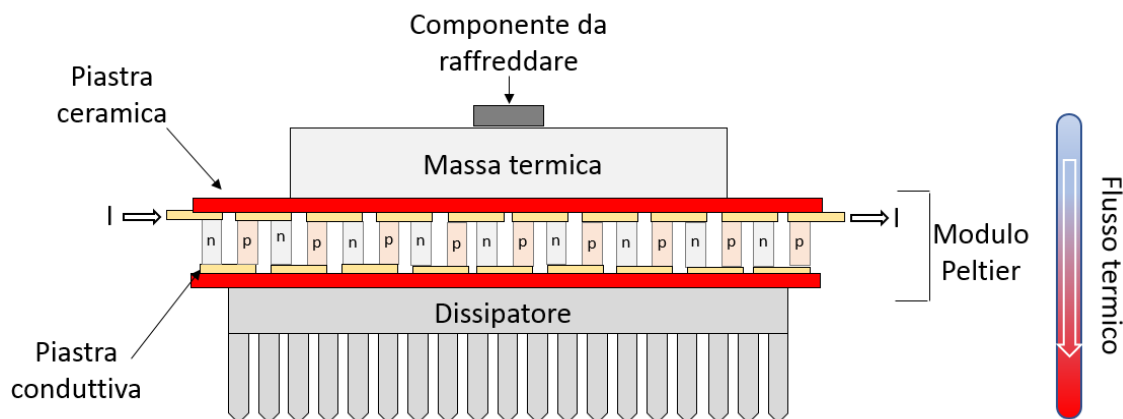


Figura 3: Utilizzo della cella di Peltier

In appendice è riportata la netlist del modello. Rispetto alla versione originale presentata nella pubblicazione [1], ho ritenuto opportuno apportare una piccola modifica in modo da poter iniettare calore sotto forma di corrente sul lato freddo (cold). Questo consente di simulare la presenza di un componente o di un oggetto che genera calore e che deve essere efficacemente raffreddato dalla cella di Peltier.

5. Cos'è un NTC, risposta in temperatura e linearizzazione

Per controllare la temperatura di una cella di Peltier è necessario misurarla con relativa precisione. Uno dei sensori più utilizzati ed economici è l'**NTC (Negative Temperature Coefficient thermistor)**, ossia un resistore il cui valore diminuisce all'aumentare della temperatura.

La relazione resistenza-temperatura di un NTC non è lineare, ma segue una legge esponenziale approssimabile con l'equazione di Steinhart–Hart:

$$R_T = R_0 e^{B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

dove:

- T è la temperatura assoluta in Kelvin,
- R_0 la resistenza del sensore alla temperatura $T_0 = 298$ K (ovvero 25°C)
- B è una costante del termistore NTC (riportata sul datasheet).
- R_0 è la resistenza alla temperatura T.

Poiché questa risposta non è lineare, in molte applicazioni è necessaria una **linearizzazione**, che può essere realizzata:

- tramite reti resistive aggiuntive che approssimano la curva,
- via software, utilizzando tabelle di conversione o algoritmi matematici nei microcontrollori.

Il metodo più semplice per linearizzare una NTC attorno ad una zona di lavoro consiste nel collegare in parallelo una resistenza il cui valore è pari a quello della NTC alla temperatura media dell'area di interesse.

Nella figura seguente è mostrato l'effetto della linearizzazione. In particolare, si è voluta linearizzare la risposta dell'NTC intorno a zero gradi centigradi collegando in parallelo una resistenza di 28kΩ, ovvero $R_{NTC}(0^\circ\text{C})$.

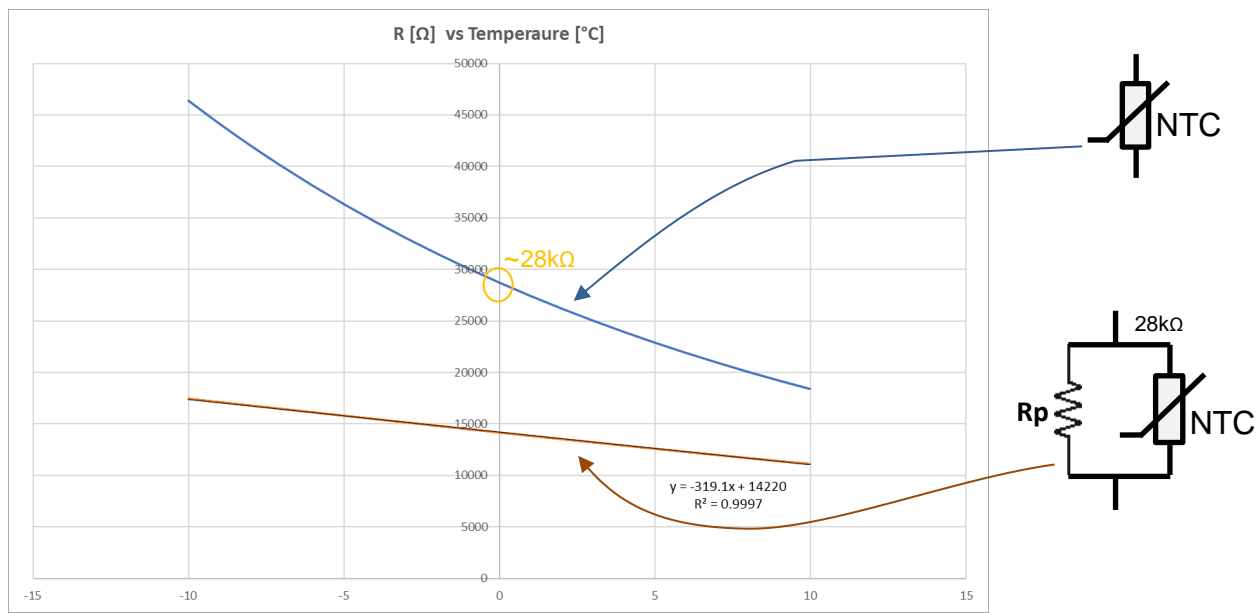


Figura 4: Effetto della linearizzazione

6. Circuito di pilotaggio di una Peltier con controllo PI

Di seguito propongo un semplice schema di un controllore PI (proporzionale-integrale) per una cella di Peltier. Come potete vedere, si tratta di una soluzione “didattica”, quindi non particolarmente complessa.

Nella figura seguente possiamo riconoscere diversi stadi elementari:

- 1) Ponte di misura con amplificatore differenziale,
- 2) Controllore PI,
- 3) Driver.

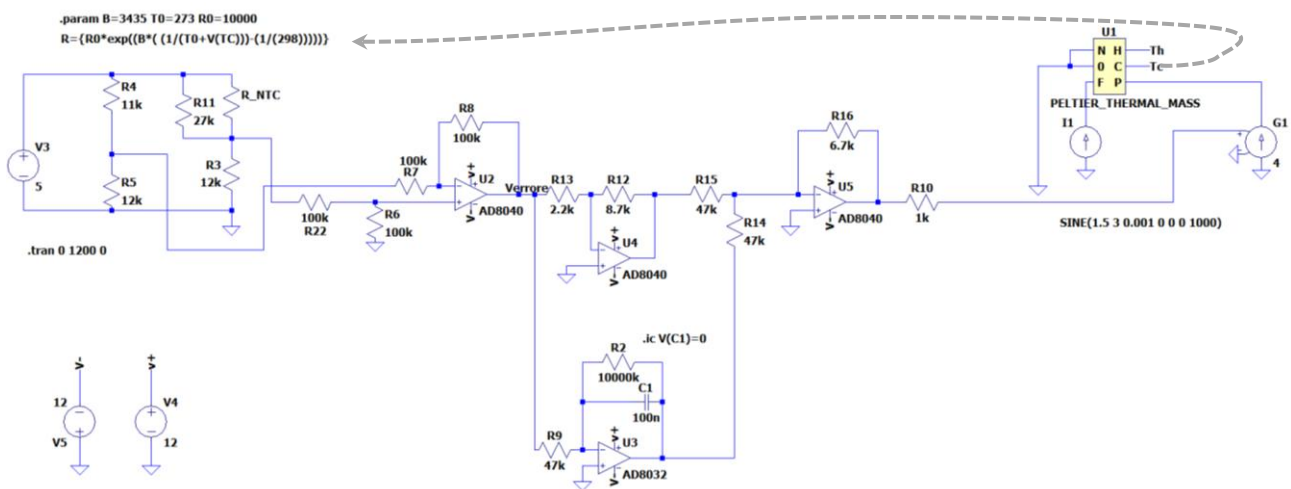


Figura 5: Schema elettrico del controllore PI

Il valore della NTC è calcolato in automatico da LTSpice durante la simulazione in base al volere di temperatura T_c (=tensione) letto sul lato freddo della cella. (riferimento linea tratteggiata)

In parallelo alla NTC è stata inserita una resistenza di linearizzazione come precedentemente visto. Le resistenze R_4 e R_5 costituiscono un partitore di tensione, progettato in modo da generare una tensione pari a quella presente tra $R_{NTC} // R_{11}$ e R_3 nel punto di lavoro. In altre parole, quando il sensore raggiunge la temperatura desiderata, la tensione tra R_4 e R_5 corrisponde esattamente a quella che si misura tra $R_{NTC} // R_{11}$ e R_3 . (Con “//” ho indicato il parallelo)

Con riferimento alla figura seguente, l'opamp U2 è collegato in configurazione "amplificatore differenziale". In particolare, alla sua uscita (punto C) abbiamo una tensione pari a $V_C = V_B - V_A$. Nel punto di lavoro abbiamo che $V_C = V_B - V_A = 0$ perché $V_B = V_A$. Se la temperatura è più alta, l'NTC avrà una resistenza bassa, quindi V_A si abbasserà (mentre V_B rimane costante), dunque V_C sarà positiva.

In altri termini, V_C rappresenta il segnale di "errore" tra temperatura desiderata e rilevata.

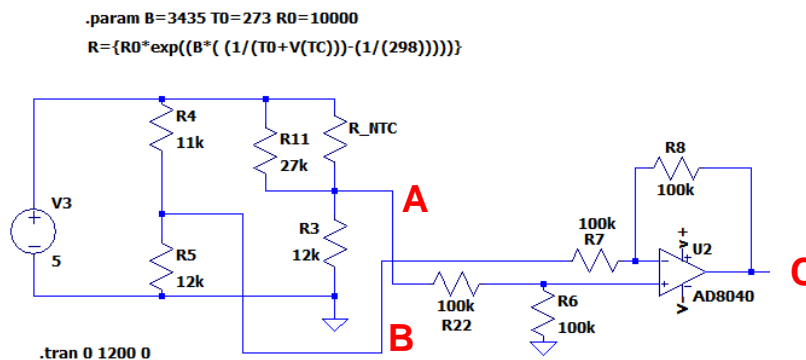


Figura 6: Ponte di misura e amplificatore differenziale

A seguire troviamo lo stadio di controllo "PI", ovvero proporzionale-integrale.

In questo stadio viene amplificata la tensione V_C di "errore" e, parallelamente, ne viene calcolato l'integrale. Infine, entrambi i contributi vengono sommati.

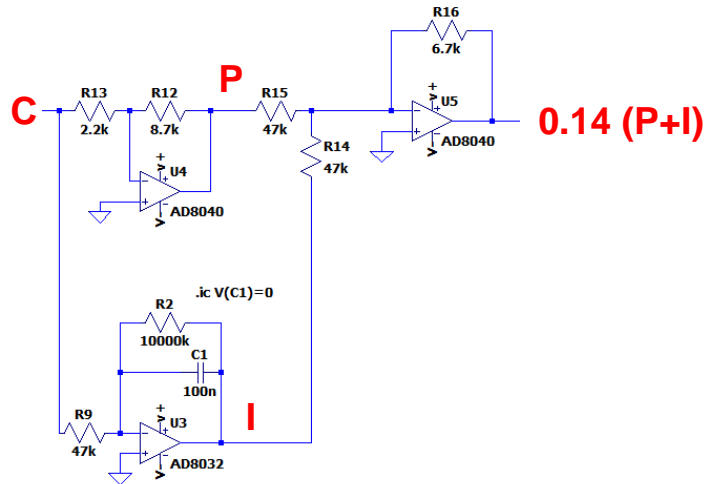


Figura 7: Stadio controllore PI

Lo stadio proporzionale è composto da un amplificatore invertente con guadagno $A_v = -R_{12}/R_{13} \approx 4$.

Lo stadio integratore effettua l'integrale del segnale V_c nel tempo secondo la relazione:

$$v_i(t) = -\frac{1}{R_9 C_1} \int_0^t v_c(t) dt$$

La resistenza R_2 da 10 M Ω aiuta a rendere lo stadio più stabile.

Il sommatore invertente a destra effettua la somma dei segnali P e I con guadagno $-R_{16}/R_{14}$ e $-R_{16}/R_{15}$.

Infine, lo stadio driver viene utilizzato per alimentare direttamente la cella in corrente partendo dalla tensione in uscita dal controllore PI.

Allo scopo di rendere il circuito semplice è stato omesso lo stadio di conversione tensione-corrente e, al suo posto, è stato utilizzato un pratico generatore di corrente comandato in tensione disponibile in LTSpice. Il risultato finale non cambia.

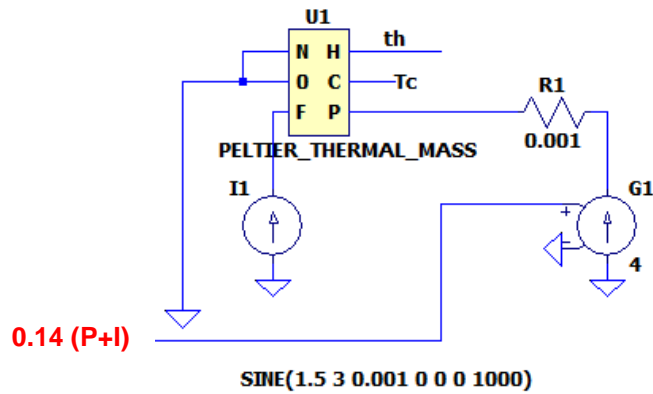


Figura 8: Stadio driver

Il generatore G1 impone alla cella una corrente definita dalla relazione $I = 4 \cdot 0.14 (V_P + V_I)$ dove V_P e V_I sono le tensioni di controllo del regolatore PI. Un aumento della corrente comporta un abbassamento della temperatura del lato freddo (T_c , cold) e, di conseguenza, un innalzamento della temperatura del lato caldo (T_h , hot).

Le temperature T_c e T_h sono espresse in volt nella simulazione (secondo le analogie elettrico-termiche introdotte all’inizio del tutorial).

Il generatore I1 simula il calore prodotto dal dispositivo da raffreddare: in altre parole, rappresenta un “disturbo termico” applicato al sistema di raffreddamento. Per verificare l’efficacia del controllore PI, tale corrente è stata modellata come una forma d’onda sinusoidale con periodo di 1000 secondi.

Nella simulazione effettuata si è voluto mantenere stabile la temperatura a ~10 gradi centigradi. Come si vede, il regolatore imposta in automatico la corrente di pilotaggio della cella in modo da raggiungere velocemente la temperatura target (curva blu) ed annullare la tensione di errore (curva rossa). In verde è riportato il segnale di “disturbo”.

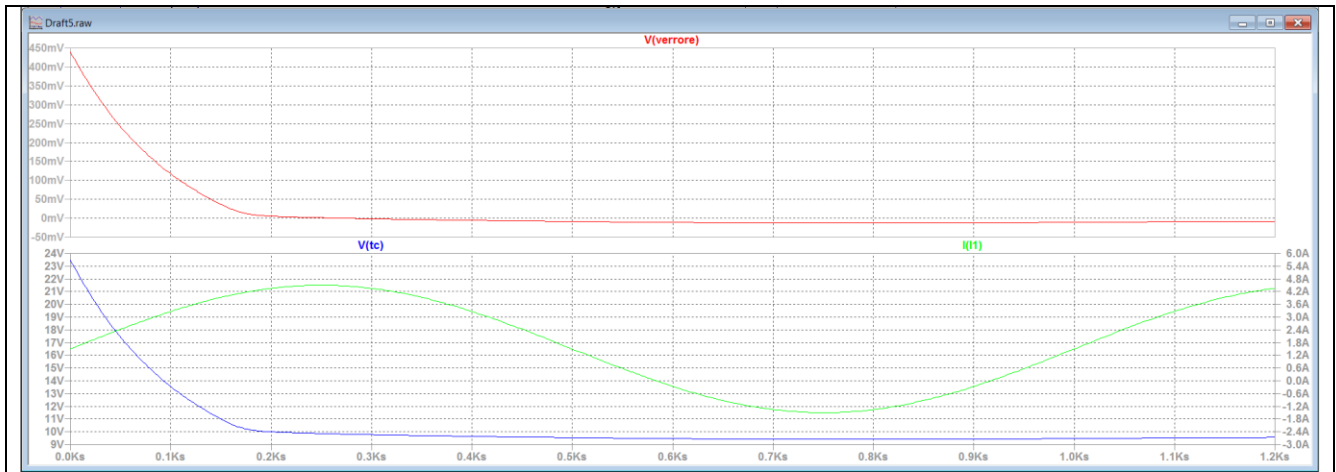


Figura 9: Simulazione del controllo PI

Nella figura seguente è mostrato il funzionamento del circuito disabilitando il controllore I e lasciando attivo solo la parte P.

Come si vede è molto più sensibile al disturbo e non riesce a raggiungere esattamente la temperatura desiderata perché, ad un certo punto, l'errore è talmente piccolo da non generare sufficiente corrente di pilotaggio per raffreddare ulteriormente.

La sezione I (integrale) del controllore è utilizzata per integrare (sommare) i piccoli contributi di errore nel tempo e generare una risposta evidente sul driver.

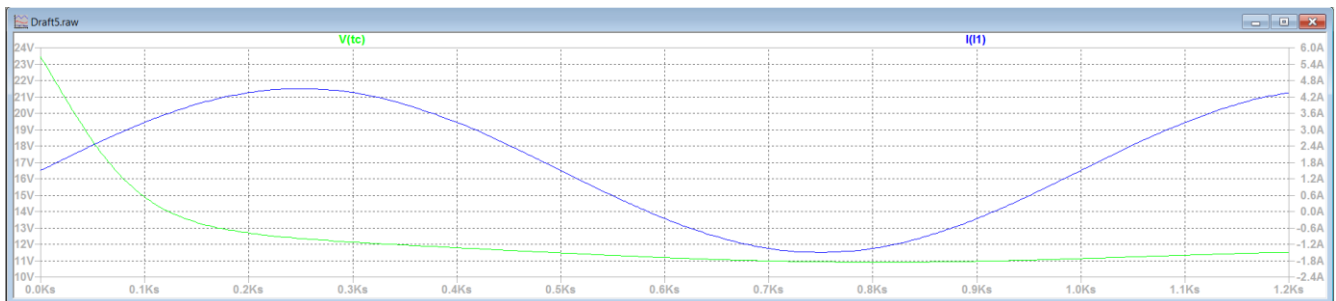


Figura 10: Simulazione del controllo P

7. Appendice

Netlist Modello

```
* -----
* | Based on: |
* | "SPICE model of thermoelectric elements including thermal effects" |
* | February 2000Conference Record - IEEE Instrumentation and Measurement |
* | Technology Conference 2:1019 - 1023 vol.2 |
* | DOI: 10.1109/IMTC.2000.848895 |
* -----

.subckt PELTIER_THERMAL_MASS H C P N 0 F
*
* -----
*   H: Hot side temperature
*   C: Cold side temperature
*   P: Positive power supply
*   N: Negative power supply
*   0: GND
*   F: Heat flux from the cooled device
* -----
*
* TAMB = AMBIENT TEMPERATURE, SE = SEEBECK CONSTANT, RM = Cell resistance
*
.PARAM TAMB=296.4, SE=0.05292, RM=1.806
.IC V(1)={TAMB} V(2)={TAMB} V(3)={TAMB} V(4)={TAMB}
*
*=====
*           THERMAL CIRCUIT
*=====
*
* HEAT SINK
*
VTAMB 3 0 value={TAMB}
RKRAD 4 3 0.34
CRAD 4 0 340
RSILH 4 1 0.143
*
* PELTIER MODEL
*
CH 1 0 2
GPE 0 1 VALUE={I(VPOS)*(I(VPOS)*RM+SE*
+(V(1)-V(2)))}
RKM 1 2 1.768
GPX 2 1 VALUE={I(VPOS)*
+(SE*V(2)-RM*I(VPOS)/2)}
CC 2 0 2
*
* THERMAL MASS
*
RSILC F 2 0.143
CCONINT F 0 304
RCONINT F 3 3.1
*
*=====
*           ELECTRICAL CIRCUIT
*=====
VPOS P 13 DC 0
RM 13 12 0.1
EALPHA 12 N VALUE = {SE*(V(1)-V(2))}
*
VTH H 0 VALUE={V(4)-273.15}
VTC C 0 VALUE={V(F)-273.15}
*
.END
```


8. Bibliografia

1. "SPICE model of thermoelectric elements including thermal effects"
Conference Paper in Conference Record - IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference · February 2000
DOI: 10.1109/IMTC.2000.848895 · Source: IEEE Xplore
Authors: Juan Antonio Chávez Domínguez (Polytechnic University of Catalonia), Juan Antonio Ortega (Polytechnic University of Catalonia), Jordi Salazar (Polytechnic University of Catalonia), Miguel J. Garcia-Hernandez (Polytechnic University of Catalonia).