

DISPOSITIVI TERMOELETRICI AD EFFETTO PELTIER PER REFRIGERAZIONE E CONTROLLO TERMICO

Principi fisici

Una coppia termoelettrica elementare è costituita da due prismi (pellet) in materiale semiconduttore. Il materiale semiconduttore, tipicamente una soluzione solida di bismuto-antimonio-tellurio-selenio, presenta drogaggio di tipo p in uno dei due prismi, mentre nell'altro presenta drogaggio di tipo n.

Nella coppia termoelettrica elementare in esame, i due prismi sono collegati tra loro ad un'estremità mediante una piastrina metallica ("giunzione fredda"), usualmente in rame. All'estremità opposta sono in contatto con altre due piastrine metalliche ("giunzioni calde"), tra le quali è inserito un generatore di corrente (fig. 1).

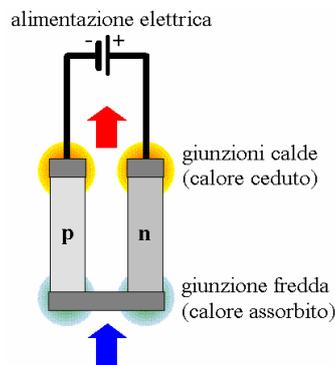


Figura 1. *Coppia termoelettrica elementare.*

Se il generatore di corrente applica alla coppia termoelettrica una corrente elettrica continua, per effetto Peltier ne risulta un trasferimento di calore dalla giunzione fredda alle giunzioni calde. Infatti, passando dal materiale drogato p a quello drogato n attraverso la giunzione fredda, gli elettroni assorbono energia per superare il locale gradino di potenziale. Dato che l'energia assorbita viene sottratta, sotto forma di calore sensibile, alla piastrina metallica che costituisce la giunzione, questa si raffredda. Al lato caldo succede il contrario, a causa del segno opposto del gradino di potenziale.

Le prestazioni in refrigerazione di una coppia termoelettrica possono essere stimate valutando i diversi apporti energetici alla giunzione fredda. Questi sono principalmente causati da:

- a) effetto Peltier
- b) effetto Joule (dissipazione elettrica)
- c) effetto Fourier (conduzione termica)

La potenza termica sottratta alla giunzione fredda per effetto Peltier è proporzionale alla corrente:

$$Q_p = 2aT_c I \quad (1)$$

Dalla relazione si ricava che l'effetto Peltier dipende anche dalla temperatura termodinamica assoluta della giunzione, T_c , e dal coefficiente di Seebeck relativo della coppia termoelettrica, a , definito come segue:

$$a = \frac{1}{2} (a_{pm} + a_{mn}) \quad (2)$$

I termini a_{pm} e a_{mn} sono i valori del coefficiente di Seebeck relativo tra semiconduttore tipo p e

metallo (rame), e tra metallo e semiconduttore tipo n.

La dissipazione per effetto Joule nella coppia termoelettrica può essere stimata sulla base della resistenza elettrica totale del circuito costituito dai prismi semiconduttori, ovvero delle resistività elettriche dei due materiali semiconduttori, r_p and r_n . Queste sono tipicamente simili, per cui si assumono uguali per semplicità, con valore pari al loro valore medio, r :

$$r = \frac{1}{2}(r_p + r_n) \quad (3)$$

Nell'ipotesi, verificabile analiticamente, che metà del calore dissipato nel circuito per effetto Joule affluisca alle giunzioni calde, e l'altra metà affluisca alla giunzione fredda, questa riceve una potenza termica valutabile mediante la relazione:

$$Q_J = \frac{1}{2}RI^2 = \frac{1}{2}\left(r \frac{2s}{A}\right)I^2 \equiv \frac{1}{2}\left(2 \frac{r}{G}\right)I^2 \quad (4)$$

Nella relazione si è introdotto un "fattore di forma" G , definito come il rapporto tra l'area della sezione trasversale dei prismi, A , e l'altezza degli stessi, s :

$$G = \frac{A}{s} \quad (5)$$

Si è assunto che il fattore di forma sia lo stesso per entrambi i prismi della coppia, come usualmente accade nei dispositivi termoelettrici commerciali. Si è inoltre trascurata la resistenza elettrica delle piastrine di rame che costituiscono le giunzioni metalliche, relativamente piccola rispetto a quella dei prismi in semiconduttore.

La potenza termica trasferita attraverso la coppia per effetto Fourier, ovvero per conduzione termica dalle giunzioni calde alle giunzioni fredde, è calcolabile mediante la relazione seguente:

$$Q_F = (k_p + k_n) \frac{A}{s} (T_h - T_c) \equiv 2kG(T_h - T_c) \quad (6)$$

T_h è la temperatura termodinamica assoluta delle giunzioni calde. Nella relazione si è introdotta una conduttività termica media della coppia termoelettrica, k , in analogia con quanto fatto per la resistività elettrica. In prima approssimazione, gli effetti della conduzione attraverso l'aria tra le giunzioni e dell'irraggiamento termico sono trascurati in quanto poco rilevanti.

Nella valutazione delle prestazioni dei moduli termoelettrici, è consuetudine assumere che a , r e k siano costanti nel semiconduttore. Ciò non è in realtà vero, in quanto le proprietà dei materiali presentano una marcata dipendenza dalla temperatura. Conseguentemente, della resistività elettrica e della conduttività termica andrebbe impiegato il valor medio integrale, che tuttavia, per moderate differenze di temperatura tra giunzione calda e giunzione fredda, è ragionevolmente approssimato dal valore calcolato alla temperatura media. Invece, per il coefficiente di Seebeck andrebbe in linea di principio utilizzato il valore alla temperatura della giunzione fredda, ma si può verificare che l'impiego del valore calcolato alla temperatura media consente di compensare un fenomeno secondario, l'effetto Thomson, che si manifesta in presenza di gradienti di temperatura nel semiconduttore (per maggiori dettagli si rimanda alla letteratura specialistica indicata in bibliografia).

In sintesi, nelle relazioni di prestazione le proprietà del semiconduttore sono sempre riferite alla temperatura media del materiale:

$$T_m = \frac{T_c + T_h}{2} \quad (7)$$

La potenza termica che in condizioni stazionarie è sottratta alla giunzione fredda di una coppia termoelettrica (in virtù del flusso di elettroni che la attraversa), e che può essere quindi estratta da un corpo o ambiente in collegamento termico con la giunzione stessa, è in definitiva data dalla

somma algebrica dei diversi contributi, dovuti agli effetti Peltier, Joule e Fourier:

$$Q_c = Q_p - Q_J - Q_F = 2 \left[aT_c I - \frac{1}{2} \frac{r}{G} I^2 - kG(T_h - T_c) \right] \quad (8)$$

Dalla relazione si può desumere che le prestazioni di un dispositivo termoelettrico dipendono essenzialmente dalle proprietà dei materiali semiconduttori. In particolare, sono desiderabili materiali in cui il coefficiente di Seebeck presente valore massimo e, al contempo, la resistività elettrica e la conduttività termica siano minime. Sfortunatamente, queste ultime due proprietà sono intrinsecamente legate tra loro e presentano proporzionalità inversa l'una all'altra: ad esempio, i metalli presentano ridottissima resistività elettrica, ma anche elevatissima conducibilità termica. La scelta del materiale deve quindi realizzare un compromesso.

In generale, si può dimostrare che i principali parametri prestazionali di un modulo termoelettrico per refrigerazione (coefficiente di prestazione, differenza di temperatura massima realizzabile tra lato caldo e lato freddo, potere refrigerante, ecc.) dipendono principalmente dalla cosiddetta “figura di merito” Z della coppia di materiali impiegati, definita come segue:

$$Z = \frac{a^2}{rk} \quad (9)$$

Poiché i materiali semiconduttori sono quelli che realizzano il valore massimo di Z (vedi fig. 2), il loro impiego nella termoelettricità per refrigerazione è oggi generalizzato.

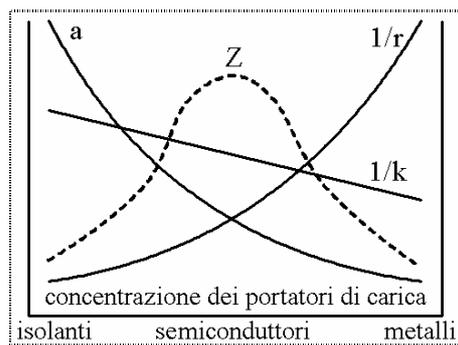


Figura 2. *Figura di merito Z.*

Il modulo termoelettrico

Nei dispositivi termoelettrici commerciali, i cosiddetti “moduli termoelettrici”, svariate coppie come quella precedentemente descritta sono connesse elettricamente in serie mediante piastrine in rame saldate alla estremità dei prismi in semiconduttore (fig. 3).

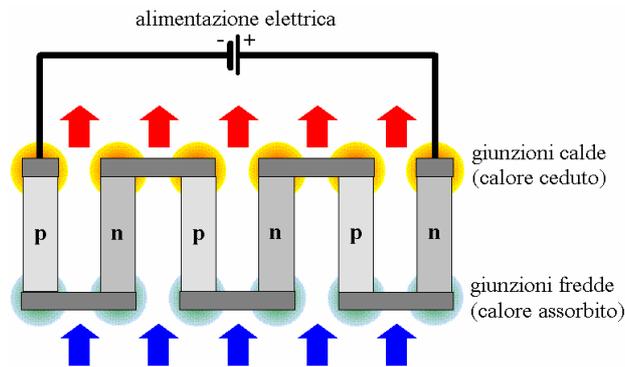


Figura 3. *Serie di coppie termoelettriche.*

Come materiale di saldatura tra prismi in semiconduttore e giunzioni in rame è generalmente utilizzata una lega metallica bassofondente (ad esempio, lega stagno-bismuto). Le coppie sono inoltre integrate tra due sottili piastre, tipicamente in materiale ceramico, che hanno il duplice scopo di garantire l'isolamento elettrico delle giunzioni metalliche e di formare le superfici di scambio termico del modulo. Una rappresentazione di tale architettura è schematizzata in fig. 4.

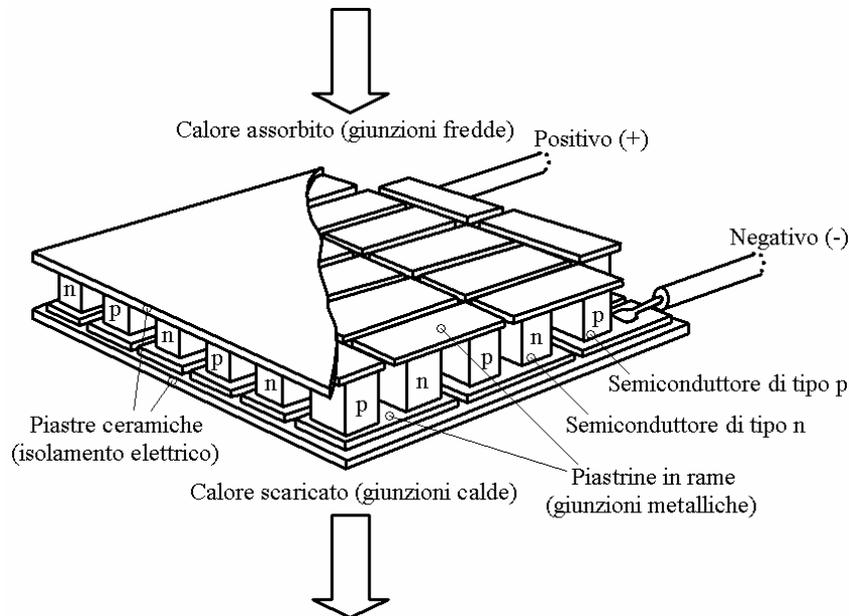


Figura 4. *Modulo termoelettrico commerciale.*

Il potere frigorifero di una pompa di calore termoelettrica costituita da N coppie, che termicamente lavorano in parallelo, è dato dalla relazione seguente:

$$Q_c = N(Q_p - Q_j - Q_f) = 2N \left[aT_c I - \frac{1}{2} \frac{r}{G} I^2 - kG(T_h - T_c) \right] \quad (10)$$

L'applicazione di una corrente elettrica continua al modulo fa sì che il calore sia sottratto al corpo o ambiente refrigerato in collegamento con la piastra ceramica saldata alle giunzioni fredde, e che sia quindi trasferito al corpo o ambiente in collegamento con la piastra opposta, saldata alle giunzioni calde. Ovviamente, dal lato caldo si deve rimuovere mediante un opportuno dissipatore di calore una potenza termica corrispondente alla somma dell'effetto frigorifero sul lato freddo e della potenza elettrica assorbita. Una valutazione di tale potenza termica può essere effettuata con procedimento analogo a quello con cui è stata ottenuta la relazione (10), ottenendo:

$$-Q_h = N(Q_p + Q_j - Q_f) = 2N \left[aT_h I + \frac{1}{2} \frac{r}{G} I^2 - kG(T_h - T_c) \right] \quad (11)$$

Il verso del flusso termico attraverso un modulo termoelettrico dipende dal verso della corrente, e si può invertire agevolmente. Infatti, è facile verificare che invertendo il segno di I nella relazione (10) si ottiene una relazione equivalente alla (11), e viceversa. I dispositivi termoelettrici possono essere quindi usati sia per raffreddare che per riscaldare, ovvero per stabilizzare la temperatura di sensori e dispositivi elettronici.

La potenza termica estratta dal corpo o dall'ambiente raffreddato e quella ceduta al corpo o all'ambiente riscaldato devono attraversare le piastre per isolamento elettrico, la cui resistenza alla conduzione termica andrebbe quindi tenuta in considerazione nelle relazioni. Tuttavia, tale resistenza è trascurabile in virtù del ridotto spessore delle piastre (<0.8 mm) e dell'elevata conduttività termica del materiale ceramico con cui sono realizzate, generalmente allumina (Al_2O_3 ,

$k > 30 \text{ W/m}\cdot\text{K}$).

L'effetto Peltier è linearmente proporzionale alla corrente, mentre l'effetto Joule presenta proporzionalità quadratica. Se ne desume che esiste un valore limite per la corrente da erogare al modulo, oltre il quale l'incremento delle dissipazioni per effetto Joule è superiore all'incremento del potere frigorifero per effetto Peltier. Inoltre, l'effetto Fourier aumenta linearmente con la differenza di temperatura tra giunzioni fredde e giunzioni calde. Esiste quindi anche un valore limite della differenza di temperatura realizzabile, in corrispondenza del quale i riflussi di calore per effetto Fourier, combinati con quelli per effetto Joule, bilanciano esattamente l'effetto Peltier ed annullano il potere frigorifero. Le relazioni convenzionalmente usate per stimare la corrente massima e la differenza di temperatura massima di un modulo termoelettrico sono le seguenti

$$I_{\max} = \frac{kG}{a} \left[\sqrt{1 + (2ZT_h)} - 1 \right] \quad (12)$$

$$\Delta T_{\max} = T_h - \left[\frac{\sqrt{1 + (2ZT_h)} - 1}{Z} \right] \quad (13)$$

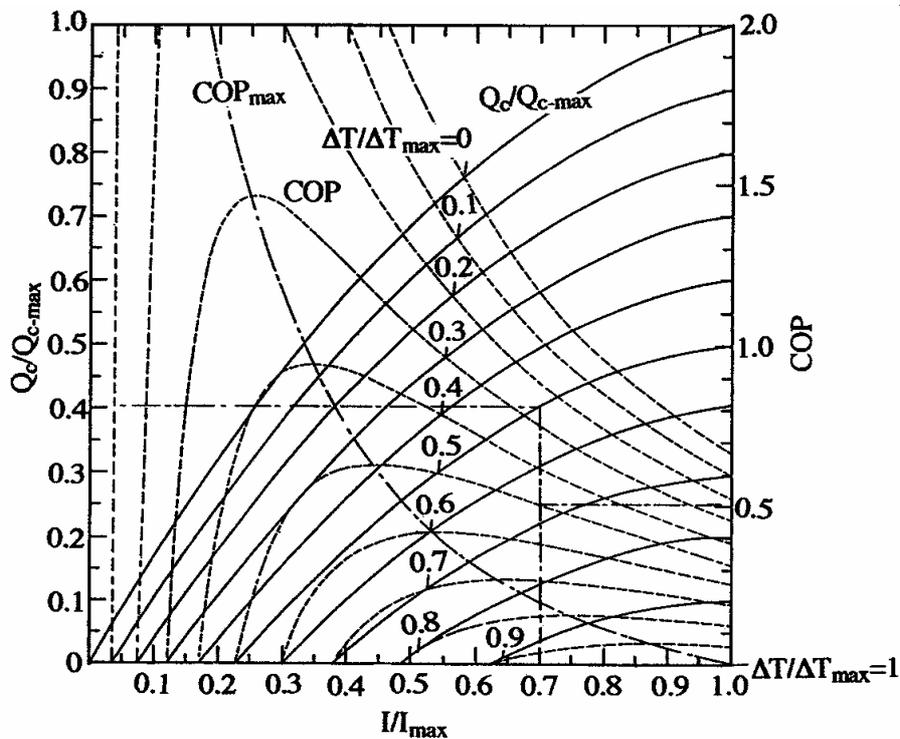


Figura 5. Diagramma universale per moduli termoelettrici a singolo stadio.

La tensione da fornire ad un modulo termoelettrico è data dalla caduta dovuta alle dissipazioni elettriche e dal bilancio algebrico dei gradini di potenziale alle giunzioni calde e fredde:

$$\Delta V = 2N \left[aT_h(T_h - T_c) + \frac{r}{G} I \right] \quad (14)$$

La potenza elettrica assorbita da un modulo termoelettrico è quindi pari a:

$$P = \Delta V \cdot I = 2N \left[aT_h(T_h - T_c) I + \frac{r}{G} I^2 \right] \quad (15)$$

Il coefficiente di prestazione è infine dato dal rapporto tra effetto frigorifero utile e potenza elettrica assorbita. In refrigerazione:

$$\text{COP} = \frac{Q_c}{P} \quad (16)$$

Le relazioni convenzionalmente impiegate per stimare il valore della corrente a cui si realizza in refrigerazione il COP massimo ed il valore di quest'ultimo sono le seguenti:

$$I_{\text{opt}} = \frac{kG(T_h - T_c)(1 + \sqrt{1 + ZT_m})}{aT_m} \quad (17)$$

$$\text{COP}_{\text{opt}} = \frac{T_m}{(T_h - T_c)} \left(\frac{\sqrt{1 + ZT_m} - 1}{\sqrt{1 + ZT_m} + 1} \right) - \frac{1}{2} \quad (18)$$

In riscaldamento (modalità pompa di calore) si ha infine:

$$\text{COP}_{\text{PdC}} = \frac{|Q_h|}{P} = \frac{Q_c}{P} + 1 \quad (19)$$

Moduli termoelettrici commerciali ed unità frigorifere termoelettriche

Il modulo termoelettrico è un prodotto industriale con caratteristiche ormai standardizzate. Un tipico modulo a singolo stadio (40 mm x 40 mm, 127 coppie) può estrarre dal vano refrigerato una potenza termica superiore a 60 W, o può consentire il raggiungimento di differenze di temperatura tra lato caldo e lato freddo superiori a 70°C.

Per conseguire differenze di temperatura maggiori, fino a 130°C ed anche oltre, si impiegano moduli termoelettrici multistadio, disposti a cascata (fig. 6).

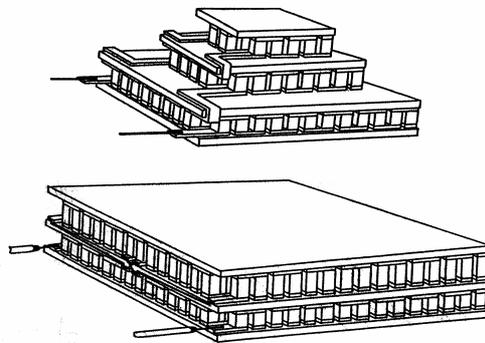


Figura 6. *Moduli termoelettrici multistadio.*

Per ottenere potenze frigorifere elevate si devono invece impiegare più moduli, termicamente in parallelo ed elettricamente in parallelo o in serie (la connessione elettrica in serie è generalmente evitata poiché il cedimento di un solo modulo inibirebbe il funzionamento dell'intero sistema). Questa architettura è necessaria perché non è semplice realizzare moduli con dimensioni superiori a circa 60 x 60 mm, a causa delle tensioni indotte dalle dilatazioni termiche differenziate tra lato caldo e lato freddo e della scarsa resistenza a flessione dei materiali impiegati. Ciò limita anche il numero di coppie integrabili (<256).

Poiché l'efficienza di un modulo termoelettrico cala drasticamente con l'aumentare della differenza tra la temperatura del suo lato freddo e la temperatura del lato caldo, tali temperature devono essere mantenute il più vicine possibile a quelle dell'ambiente refrigerato e dell'ambiente in cui viene rilasciato il calore, rispettivamente.

Ogni modulo termoelettrico ha poi un intervallo utile per la temperatura operativa, fuori del quale può avere prestazioni insoddisfacenti o cessare di funzionare: infatti, l'effetto Peltier cala drasticamente d'intensità al calare della temperatura del materiale semiconduttore, mentre temperature troppo elevate possono portare all'accelerazione dei processi di diffusione ionica o, addirittura, alla fusione delle saldature tra semiconduttori e giunzioni metalliche, realizzate in leghe che fondono a bassa temperatura (tra 130°C e 170°C).

Per tutte le ragioni sopra esposte, è necessario corredare un modulo termoelettrico di adeguati dispositivi per la dissipazione del calore, atti ad evacuare in modo efficiente l'energia termica generata o assorbita alle giunzioni. Si impiegano a tal scopo scambiatori di calore a superficie alettata o anche semplici piastre metalliche e, più raramente, scambiatori a liquido o a tubi di calore.

L'insieme di modulo termoelettrico, scambiatori di calore e organi accessori a questi direttamente collegati costituisce l'unità frigorifera termoelettrica, le cui più comuni configurazioni sono schematizzate in fig. 7.

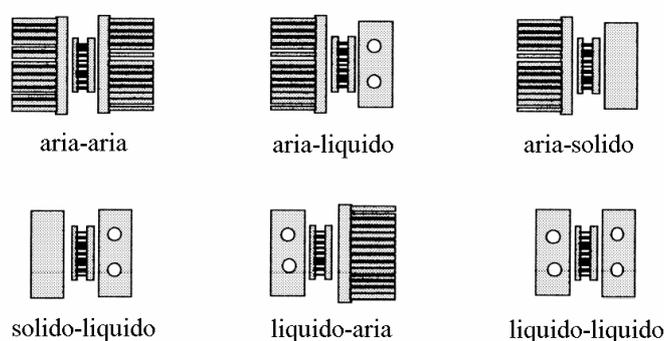


Figura 7. Configurazioni tipiche di un'unità frigorifera termoelettrica.

La dissipazione di calore mediante superfici alettate, lambite da un flusso d'aria, è la tecnica più semplice ed economica da implementare. Tuttavia, le ventole eventualmente impiegate per movimentare l'aria possono nel tempo diventare rumorose o cessare di funzionare per sporcamento o usura dei cuscinetti. A ciò va poi aggiunto che, quando un'unità termoelettrica con superfici alettate su entrambi i lati del modulo termoelettrico è inattiva, si instaura attraverso il modulo un ponte termico, il quale comporta significativi riflussi di calore dal lato caldo al lato freddo.

La dissipazione di calore a liquido, oltre ad essere in generale più efficace, permette di introdurre un diodo termico nel sistema e, quindi, di inibire i riflussi di calore suddetti. Tuttavia, la circolazione del liquido richiede l'impiego di dispositivi ausiliari di pompaggio, i quali, forse anche più dei dispositivi di ventilazione forzata, possono diventare causa di rumorosità e malfunzionamenti.

In generale, la scelta del tipo di dissipatore deve realizzare un compromesso tra opposte esigenze.

Applicazioni civili ed industriali della refrigerazione termoelettrica

Un'unità frigorifera termoelettrica in una delle sue possibili configurazioni viene alla fine corredata di una serie di organi e componenti accessori (sensori, gruppi di alimentazione elettrica e controllo termico, rivestimenti per isolamento termico, ecc.) ed integrata nel *prodotto* in cui deve esplicare le sue funzioni di trasferimento del calore.

La gamma delle applicazioni civili, scientifiche e industriali della tecnologia termoelettrica per refrigerazione è così ampia da spaziare, ad esempio, dal frigorifero/scaldavivande portatile al raffreddamento di sensori a temperature criogeniche e/o stabilizzate con elevato grado di accuratezza. In considerazione della considerevole quantità di prodotti termoelettrici in commercio,

non è possibile passare in rassegna tutto ciò che il mercato offre, ma solo individuare i principali ambiti applicativi, attuali e previsti, e, per ognuno di essi, alcuni casi particolarmente degni di menzione. Un quadro riassuntivo è dato in tab. 1.

Tabella1. *Applicazioni correnti e allo studio della refrigerazione termoelettrica.*

Ambito	Applicazioni
medicale e farmaceutico	<ul style="list-style-type: none"> • controllo termico di sistemi di laboratorio e per analisi • frigocontenitori per conservazione e trasporto farmaci ed organi • piastre per terapia del freddo
elettronica e telecomunicazioni	<ul style="list-style-type: none"> • controllo termico di processori • controllo termico di cabinet per apparecchiature elettroniche • stabilizzazione termica di diodi laser per fibre ottiche, sensori CCD, lampade a led, ecc.
veicolo	<ul style="list-style-type: none"> • frigoriferi compatti • controllo termico di sensori nell'infrarosso per sistemi di guida notturna • caschi motociclistici refrigerati • sedili refrigerati • volantini refrigerati
scientifico	<ul style="list-style-type: none"> • stabilizzazione termica di sensori e sistemi di calibrazione e misura • piastre fredde e calde per laboratorio • camere climatiche
militare e aerospaziale	<ul style="list-style-type: none"> • stabilizzazione termica di sensori per missili ed apparati di ricerca notturna
domestico e civile	<ul style="list-style-type: none"> • vani per conservazione di medicinali • minibar per uffici e alberghi • frigoriferi e scaldavivande portatili • controllo termico di acquari • distributori di bevande e gelati • espositori refrigerati per grande e piccola distribuzione • cantine per vini • frigoriferi domestici

Si tratta in generale di applicazioni in cui sono richieste piccole potenze frigorifere, dell'ordine di alcune decine di watt. Gli attuali limiti e, conseguentemente, gli spazi per ulteriori miglioramenti della tecnologia termoelettrica sono infatti indotti dalla limitata potenza ed efficienza di funzionamento dei moduli termoelettrici, e ne rendono poco conveniente l'impiego quando è richiesto un elevato potere refrigerante – ad esempio, se si devono raffreddare o climatizzare grandi ambienti come celle frigorifere o locali abitati.

Bibliografia e riferimenti utili

- D.M. Rowe, *CRC Handbook of Thermoelectrics*, CRC Press, 1995
- S. Salvigni, G.S. Barozzi, G. Raffellini, *Esercizi di Fisica Tecnica, 1. Termoelettricità e Termocinetica*, Libreria Editoriale Pedroni, 1982
- *Marlow*, www.marlow.com
- *Melcor*, www.melcor.com
- *Sirec Engineering*, www.sirecengineering.com
- *Tellurex*, www.tellurex.com
- *The International Thermoelectric Society*, www.its.org