

# Ricerca di Sistema elettrico



## **Analisi dell'efficienza a massima potenza di generatori termoelettrici operanti in regime dinamico (LA1.5)**

Dario Narducci, Università di Milano Bicocca



## ANALISI DELL'EFFICIENZA A MASSIMA POTENZA DI GENERATORI TERMOELETTRICI OPERANTI IN REGIME DINAMICO (LA1.5)

Dario Narducci, Università di Milano Bicocca, Dipartimento di Scienza dei Materiali

Giugno 2023

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA  
Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: *Decarbonizzazione*

Progetto: *Materiali di frontiera per usi energetici*

Linea di attività: *1.5*

Responsabile del Progetto: *Daniele, Mirabile Gattia (ENEA)*

Responsabile del Work Package: *Francesca Di Benedetto (ENEA)*

Responsabile Linea di Attività: *Dario Narducci, Università di Milano Bicocca, Dipartimento di Scienza dei Materiali*

Mese inizio previsto: gennaio 2022

Mese inizio effettivo: gennaio 2022

Mese fine previsto: giugno 2023

Mese fine effettivo: giugno 2023

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "LA 1.5: Analisi dell'efficienza a massima potenza di generatori termoelettrici operanti in regime dinamico e LA 1.6: Realizzazione e validazione di un prototipo di generatore termoelettrico operante in regime dinamico"

Responsabile scientifico ENEA: Antonella, Rizzo

Responsabile scientifico Co-beneficiario: Dario, Narducci

## Indice

1	RISULTATI ATTESI .....	3
2	RISULTATI OTTENUTI.....	3
3	PRODOTTI ATTESI.....	4
4	PRODOTTI SVILUPPATI .....	4
5	ANALISI DEGLI SCOSTAMENTI SU ATTIVITÀ E RISULTATI .....	4
6	SINTESI DELLE ATTIVITÀ SVOLTE .....	4
7	DETTAGLIO DELLE ATTIVITÀ SVOLTE.....	5
8	CONTRIBUTO DELLE EVENTUALI CONSULENZE ALLE ATTIVITÀ SOPRA DESCRITTE.....	10
9	PUBBLICAZIONI SCIENTIFICHE.....	10
10	EVENTI DI DISSEMINAZIONE .....	10

# 1 Risultati attesi

## 1.1 Lista dei risultati attesi per la Linea di Attività 1.5

1. Un modello teorico-analitico in grado di quantificare l'incremento dell'efficienza a massima potenza di generatori termoelettrici basati su materiali termoelettrici esistenti e disponibili ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  e Si, principalmente) a seguito della somministrazione di flussi termici, modulati nel tempo direttamente ovvero attraverso la variazione della differenza di temperatura applicata.
2. Una valutazione quantitativa dell'incremento di potenza ottenibile, sia utilizzando carichi resistivi costanti sia carichi resistivi modulati nel tempo
3. Una indicazione delle caratteristiche del materiale termoelettrico idoneo a massimizzazione la potenza generata
4. Indicazioni circa le tecnologie da considerare (elettromeccaniche di bassa frequenza o di elettronica integrata per l'alta frequenza) per la realizzazione del sistema di modulazione dell'input termico, sia nel caso di moduli attivi (alimentati) sia di moduli passivi
5. Simulazioni numeriche della geometria dei modulatori elettromeccanici ("buzzer termici")
6. Simulazioni numeriche della geometria dei modulatori magnetocalorici
7. Pubblicazioni scientifiche su riviste peer-reviewed
8. Presentazioni congressuali.

# 2 Risultati ottenuti

## 2.1 Lista dei risultati ottenuti per la Linea di Attività 1.5

1. Un modello teorico-analitico in grado di quantificare l'incremento dell'efficienza a massima potenza di generatori termoelettrici basati su materiali termoelettrici esistenti e disponibili ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  e Si, principalmente) a seguito della somministrazione di flussi termici, modulati nel tempo direttamente ovvero attraverso la variazione della differenza di temperatura applicata.
2. Una valutazione quantitativa dell'incremento di potenza ottenibile, sia utilizzando carichi resistivi costanti sia carichi resistivi modulati nel tempo
3. Una indicazione delle caratteristiche del materiale termoelettrico idoneo a massimizzazione la potenza generata
4. Indicazioni circa le tecnologie da considerare (elettromeccaniche di bassa frequenza o di elettronica integrata per l'alta frequenza) per la realizzazione del sistema di modulazione dell'input termico, sia nel caso di moduli attivi (alimentati) sia di moduli passivi
5. Simulazioni numeriche della geometria dei modulatori elettromeccanici ("buzzer termici")
6. Simulazioni numeriche della geometria dei modulatori magnetocalorici
7. Pubblicazioni scientifiche su riviste peer-reviewed
8. Presentazioni congressuali.

### 3 Prodotti attesi

La Linea di Attività 1.5 non prevedeva prodotti hardware/software.

### 4 Prodotti sviluppati

Nessuno.

### 5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Nessuno scostamento rispetto al piano delle attività previste per la Linea di Attività 1.5.

### 6 Sintesi delle attività svolte

Sintesi delle attività svolte e dei risultati ottenuti in relazione ai risultati attesi.

E' stata analizzata la dipendenza della efficienza a massima potenza di un generatore termoelettrico che opera in regime dinamico convertendo il calore fornito da una sorgente calda la cui temperatura è modulata periodicamente nel tempo con pulsazione  $\omega$  e che rilascia calore ad un termostato freddo a temperatura costante. E' stata ricavata in forma analitica la soluzione completa dell'equazione dinamica di Domenicali e, attraverso di essa, si è calcolata la potenza elettrica media generata su un ciclo di durata  $2\pi/\omega$  e l'efficienza a massima potenza. Confrontando tali valori con le corrispondenti potenze ed efficienze a massima potenza ottenibili in regime stazionario si è dimostrata la possibilità di incrementare la potenza elettrica e l'efficienza a massima potenza del 50 %. Tale incremento è equivalente ad un raddoppio della figura di merito termoelettrica del dispositivo.

## 7 Dettaglio delle attività svolte

### 7.1 Introduzione

La ricerca e lo sviluppo di dispositivi per la conversione termoelettrica dei flussi di calore in energia elettrica è principalmente concentrato verso la realizzazione di nuovi materiali ad alta efficienza e a maggiore geodisponibilità (1). Le parziali evidenze su come la modulazione del flusso termico in ingresso potrebbe portare ad aumenti significativi nell'efficienza di un TEG non hanno cambiato questo stato di cose, anche alla luce del fatto che quasi tutte le analisi riportate nella letteratura sono concentrate sulla modulazione on/off dei flussi (onde quadre), cosa che probabilmente evidenzia la difficoltà di generare flussi termici modulati in modo non discontinuo.

Sebbene sia ben noto come la massima efficienza (e quindi il massimo lavoro) di una macchina termica sia raggiunto in condizioni reversibili, nelle applicazioni reali lo sforzo progettuale è normalmente rivolto verso la realizzazione di macchine termiche capaci di convertire calore generando la massima potenza. Conseguentemente, è l'efficienza alla massima potenza (EMP) il primario obiettivo nel disegno dei sistemi di conversione del calore. Questo è anche più vero nel caso degli harvester di calore, che fanno uso di calore di scarto (quindi di calore disponibile a costo nullo).

Nelle macchine termiche cicliche, il primo calcolo della massima EMP fu proposto da Novikov (2), sebbene fu un articolo di Curzon e Ahlborn (3) pubblicato più di quindici anni dopo a dare visibilità al risultato. La prima analisi dell'efficienza (coefficiente di prestazione) dei generatori termoelettrici (refrigeratori) mediante l'applicazione di differenze di temperatura (densità di corrente) modulate nel tempo è stata riportata da Gray (4) nel 1960. Tuttavia, la complessità matematica del problema ha costretto la sua analisi al limite di piccolo segnale (regime lineare). Tentativi di riprendere il problema sono apparsi sporadicamente nella letteratura negli ultimi decenni, sebbene ancora nessuna soluzione esatta del problema di Gray sia stata proposta. Sul fronte numerico, finora la maggior parte delle analisi è stata limitata allo studio TEG alimentati in maniera impulsata (5–12), sul calcolo dell'effetto di sottoraffreddamento che può essere temporaneamente raggiunto alimentando i refrigeratori termoelettrici con impulsi di corrente (13). Infine, mancando un chiaro quadro teorico di riferimento, i pochi lavori sperimentali apparsi negli ultimi anni hanno analizzato o la potenza generata in condizioni di transitorio (14–17) o si sono limitati a misurare la dinamica dei termovoltage (18, 19). In questo studio viene riconsiderato il problema della risposta di un mezzo termoelettrico (TE) all'applicazione di una differenza di temperatura modulata nel tempo.

### 7.2 Definizione del problema

L'applicazione di una differenza di temperatura  $\Delta T$  modulata sinusoidalmente attraverso un mezzo termoelettrico è nota (18) determinare un aumento della potenza media in uscita su un ciclo poiché la potenza elettrica istantanea scala con  $(\Delta T)^2$ . Pertanto, l'aumento della potenza in uscita durante il semiciclo in cui  $\Delta T(t) > \langle \Delta T(t) \rangle$  sovracompenza la sua riduzione nel semiciclo opposto (Fig. 1). Va notato che tale *vantaggio entalpico* si verifica senza cambiare la temperatura media del dissipatore caldo. Questo è un requisito fondamentale nella maggior parte delle applicazioni perché perturbare la sorgente di calore può causare una diminuzione dell'efficienza del processo primario che produce calore di scarto (ad esempio, nelle celle fotovoltaiche (20)) o può portare a un guasto prematuro di componenti critiche (ad esempio, quando si recupera calore da dispositivi elettrici o elettronici).

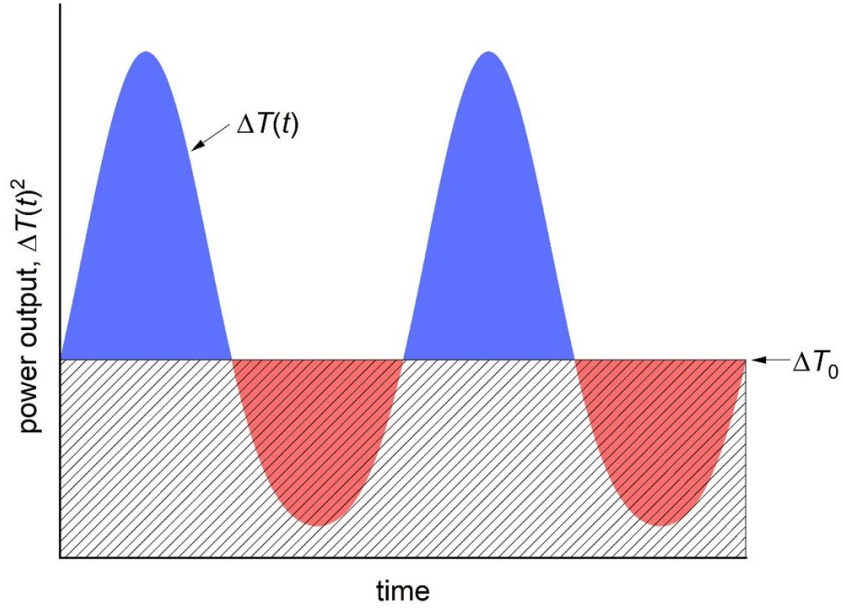


Figura 1: Potenza elettrica istantanea generata da un TEG operante in regime dinamico: si osservi come l'aumento della potenza in uscita durante il semiciclo in cui  $\Delta T(t) > \langle \Delta T(t) \rangle$  (area blu) sovracompenzi la riduzione della potenza nel semiciclo opposto (area rossa).

In un sistema pseudo-1D, trascurando la dissipazione di calore perpendicolarmente al gradiente di temperatura,

$$c_V \partial_t T(x, t) = \kappa \partial_{xx} T(x, t) + J_f(t)^2 / \sigma_T \quad (1)$$

dove  $c_V$  è il calore specifico isocoro,  $J_f$  è la densità di corrente,  $\sigma_T$  è la conducibilità elettrica isoterma mentre la conducibilità termica  $\kappa$  è la somma delle componenti fononiche ed elettroniche a circuito aperto.

L'equazione (1) può essere integrata trascurando la dipendenza dalla temperatura dei coefficienti fenomenologici per un sistema di lunghezza  $\ell$  dove il termostato freddo è mantenuto a una temperatura fissa  $T_C$  mentre la sorgente calda fornisce calore al mezzo termoelettrico attraverso una resistenza termica variabile, in modo che la temperatura al lato caldo della gamba TE sia  $T_h(t) = T_h^{(0)} + T_0 \sin \omega t$ . Trascurando transitori iniziali e resistenze di contatto, il profilo di temperatura lungo la gamba TE è dato da

$$T(x, t) = \left(1 - \frac{x}{\ell}\right) \left(T_h^{(0)} + T_0 \sin \omega t\right) + T_C \frac{x}{\ell} + T_h^{(0)} \sum_{n=1}^{\infty} D_n(\omega, t) \sin \frac{n\pi x}{\ell} \quad (2)$$

dove

$$D_n(\omega, t) = -\frac{2}{n\pi} \int_0^{t/\tau_{th}} e^{-n^2 \pi^2 (t-\tau)/\tau_{th}} \left( \gamma_n \frac{J_f(\tau)^2}{\sigma_T c_V} + \omega T_0 \right) d\tau \quad (3)$$

$\tau_{th} = c_V \ell^2 / \kappa$  è il tempo di rilassamento termico e  $\gamma_n = -1 + (-1)^n$ .

I flussi di calore in ingresso e in uscita sono quindi calcolati come  $J_q(x, t) = -\kappa \partial_x T(x, t) + \alpha T(x, t) J_f(t)$  e quindi

$$\begin{aligned} J_q(0, t) &= \frac{\kappa}{\ell} \Delta T(t) + \alpha J_f(t) T_h(t) - \frac{\kappa T_h^{(0)}}{\ell} \sum_{n=1}^{\infty} n\pi D_n(\omega, t) \\ J_q(\ell, t) &= \frac{\kappa}{\ell} \Delta T(t) + \alpha J_f(t) T_C - \frac{\kappa T_h^{(0)}}{\ell} \sum_{n=1}^{\infty} n\pi D_n(\omega, t) \cos n\pi \end{aligned} \quad (4)$$

dove  $\Delta T(t) = T_h^{(0)} + T_0 \sin \omega t - T_C$ . La differenza  $\Delta J_q(t) = J_q(0, t) - J_q(\ell, t)$  risulta quindi pari a

$$\Delta J_q(t) = \alpha J_f(t) \Delta T(t) - \frac{2\kappa}{\sigma_T \ell c_V} \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n \int_0^t e^{-n^2 \pi^2 t'/\tau_{th}} J_f(t-t')^2 dt' \quad (5)$$

Come atteso, il termine di bilancio di calore  $\Delta J_q(t)$  non è nullo anche in un materiale non termoelettrico, perché il calore viene temporaneamente immagazzinato all'interno della gamba mentre, ovviamente,

$$\int_0^{2\pi/\omega} \Delta J_q(t) dt = 0.$$

Il problema di Domenicali è chiuso osservando che, poiché nessuna carica si accumula nel mezzo, la densità di corrente risponde istantaneamente alle variazioni della differenza di temperatura  $\Delta T(t)$  lungo la gamba, in modo che  $J_t(t) = (\sigma_T \alpha / \ell) \Delta T(t) / (m + 1)$ , dove  $m = R_L / R_{TE}$  è il rapporto tra le resistenze elettriche del mezzo termoelettrico  $R_{TE}$  e del carico elettrico  $R_L$ . Pertanto

$$\Delta J_q(t) = \frac{\sigma_T \alpha^2}{\ell} \left( \frac{\Delta T(t)^2}{m+1} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\gamma_n^2 A_n(\omega, t)}{(m+1)^2} \right) \quad (6)$$

con

$$A_n(\omega, t) = \frac{2\Delta T^{(0)2} + T_0^2}{n^2 \pi^2} + 4T_0 \Delta T^{(0)} \frac{n^2 \pi^2 \sin \omega t - 4\omega \tau_{th} \cos \omega t}{n^4 \pi^4 + (\omega \tau_{th})^2} - T_0^2 \frac{2\omega \tau_{th} \sin 2\omega t + n^2 \pi^2 \cos 2\omega t}{n^4 \pi^4 + 4(\omega \tau_{th})^2} \quad (7)$$

dove  $\Delta T^{(0)} \equiv T_h^{(0)} - T_c$ . Come previsto, la non linearità della Eq. (1) introduce in  $A_n(\omega, t)$  termini di seconda armonica.

L'efficienza a massima potenza consegue massimizzando la potenza media in uscita su un ciclo di durata  $2\pi/\omega$ . Il matching del carico elettrico è per  $m = 1$ , come nel caso stazionario, con la massima densità di potenza media pari a

$$\langle J_w(t) \rangle_{2\pi/\omega} \Big|_{m=1} = \frac{\sigma_T \alpha^2}{4\ell} \left( \Delta T^{(0)2} + \frac{T_0^2}{2} \right) \quad (8)$$

L'EMP risulta quindi

$$\eta_{MP} = \frac{4Z(\Delta T^{(0)2} + T_0^2/2)}{16\Delta T^{(0)}(1 + ZT_H^{(0)}/2) + 3ZT_0^2 - 2Z\Delta T^{(0)2}} \quad (9)$$

dove  $Z = \sigma_T \alpha^2 / \kappa$ . Nel limite stazionario ( $T_0 = 0$ ),  $\eta_{MP}$  è limitata da sopra per  $Z \rightarrow \infty$  a  $\eta_c / (2 - \eta_c / 2)$  (dove  $\eta_c$  è l'efficienza di Carnot) ovvero all'EMP di Schmiiedl—Seifert (21)  $\eta_c / (2 - \gamma \eta_c)$  con  $\gamma = 1/2$ . A sua volta,  $\eta_{MP}$  si riduce all'efficienza di Curzon--Ahlborn  $\eta_c / 2$  per  $\Delta T^{(0)}$  tendente a zero. È da notare che il termine aggiuntivo nell'Eq. (8) a frequenza non nulla ha origine dalla modulazione della temperatura del dissipatore caldo. Come anticipato, sebbene la temperatura media del dissipatore caldo sia pari a  $T_h^{(0)}$  sia in modalità stazionaria sia in modalità modulata nel tempo, la diminuzione della potenza durante il semiciclo con  $T_h(t) < T_h^{(0)}$  è sovracompensata dal suo aumento durante il semiciclo opposto. Di conseguenza, né la densità di potenza in uscita né l'EMP dipendono dalla durata del ciclo  $2\pi/\omega$ . Dal punto di vista del materiale, le sue caratteristiche entrano nell'EMP unicamente attraverso  $\sigma_T$ ,  $\alpha$  e  $\kappa$ .

La massima efficienza (ME) richiede invece  $m = m_{ME} \equiv [1 + Z(T_h^{(0)2} - T_c^2 + T_0^2/2) / (2\Delta T^{(0)})]^{1/2}$ , dove la massima efficienza risulta pari a

$$\eta_{max} = 2\beta Z \frac{\Delta T^{(0)2} + T_0^2/2}{(\beta + 2) \left( ZT_0^2 + 2ZT_H^{(0)2} + 4T_H^{(0)} \right) - 4ZT_C^2 - 2T_C \left( \beta(ZT_H^{(0)} + 2) + 4 \right)} \quad (10)$$

con  $\beta = \sqrt{4 + 2Z \left( T_H^{(0)2} - T_C^2 + T_0^2/2 \right) / \Delta T^{(0)}}$ . Nel limite stazionario ( $T_0 = 0$ ) si ottiene la formula standard dell'efficienza massima di Ioffe (22), con massima efficienza per  $m_{ME} = \sqrt{1 + Z(T_h^{(0)} + T_c)/2}$ .

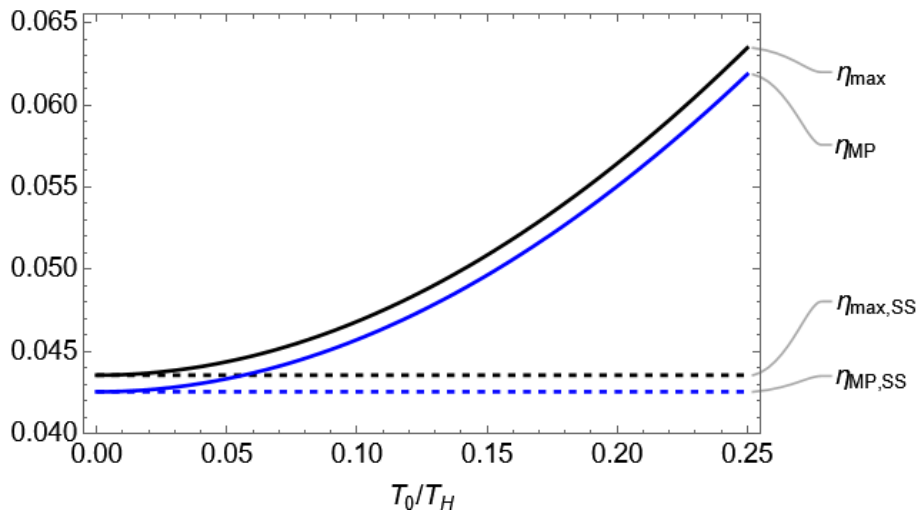


Figura 2: Efficienza a massima potenza  $\eta_{MP}$  e massima efficienza  $\eta_{ME}$  in funzione dell'ampiezza di modulazione della temperatura  $T_0$  confrontate con le corrispondenti efficienze stazionarie (ss) per  $ZT = 1$  a 300 K.

La Figura 2 riporta le efficienze in funzione dell'ampiezza di modulazione della temperatura  $T_0$  per valori tipici delle proprietà di trasporto di  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , materiale standard nei TEG commerciali. Come atteso, l'EMP è leggermente inferiore a  $\eta_{ME}$  mentre la massima EMP in condizioni dinamiche (per  $m = 1$ ) presenta un incremento del 50 % rispetto al caso stazionario. Può essere utile esprimere l'incremento di EMP calcolando il valore di  $ZT$  che dovrebbe avere un TEG operante in regime stazionario per avere l'EMP ottenibile operando in regime dinamico con TEG commerciale, con  $ZT = 1$  a temperatura ambiente (Fig. 3). Si ottiene una figura di merito termoelettrica equivalente  $(ZT)_{\text{equiv}} \approx 1.8$  per  $T_0$  massimo.

Il caso in cui il carico sia non costante (modulato) è stato analizzato con tecniche variazionali. Il matching ottimale resta confermato per  $m = 1$ .

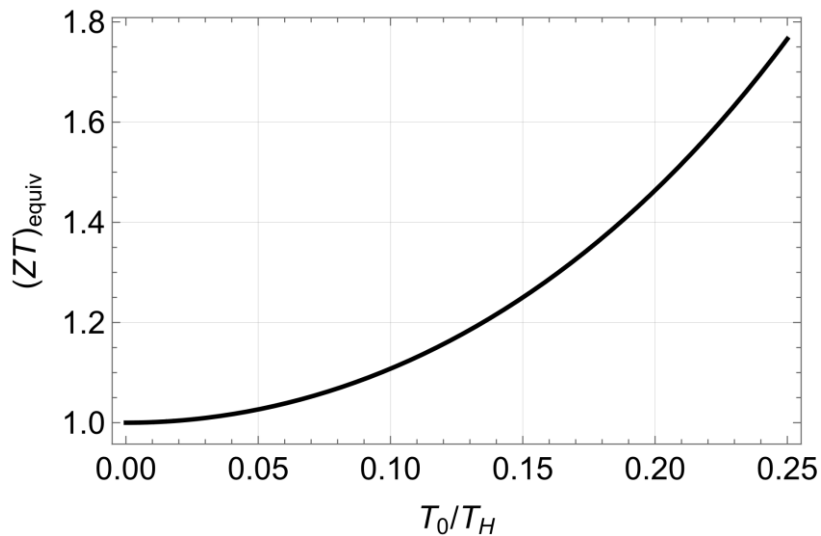


Figura 3: Dipendenza dall'ampiezza di modulazione della figura di merito termoelettrica equivalente  $(ZT)_{\text{eq}}$  definita come la figura di merito termoelettrica che dovrebbe avere un TEG operante in condizioni stazionarie per eguagliare la EMP di un TEG caratterizzato da uno  $ZT = 1$  a 300 K ma operante in regime dinamico.

### 7.3 Modulatori termici

I risultati ottenuti evidenziano la necessità di una trasformazione di paradigma nel disegno dei *moduli* termoelettrici. Mentre attualmente un modulo termoelettrico per la generazione di potenza è costituito da un dispositivo TEG accoppiato ad un dissipatore (attivo o passivo) al lato freddo e direttamente accoppiato alla sorgente di calore al lato caldo, appare evidente come l'interposizione di un modulatore termico possa abilitare un significativo incremento di EMP senza introdurre oneri di gestione e di disegno del sistema per l'utilizzatore finale.

Avendo verificato come la frequenza di modulazione della temperatura non alteri la EMP ottenibile, la scelta dell'intervallo di frequenze angolari di modulazione esperibili può essere interamente determinata da considerazioni di convenienza tecnologica e pratica.

E' utile osservare che un TEG dinamico deve operare su una differenza di temperatura modulata nel tempo ma mediamente pari alla differenza di temperatura tra cui esso opererebbe in condizioni stazionarie. La progettazione del modulatore assume quindi che il modulatore operi interponendo una resistenza termica variabile tra la sorgente di calore (reattore chimico, bruciatore, etc.) e il TEG, determinandone alternatamente un surriscaldamento e un sopraraffreddamento, con ampiezze di oscillazione della temperatura e periodicità accettabili per la sorgente primaria stessa. Ciò fissa ovviamente la frequenza minima di modulazione, dell'ordine degli Hz. Il disegno e lo sviluppo dei modulatori si è indirizzato quindi verso dispositivi optomeccanici (attivi) e termomeccanici (passivi). Nella prima categoria sono stati disegnati e simulati numericamente accoppiatori radiativi (attivi) mentre nella seconda categoria sono stati studiati "buzzer" termici (passivi) e dispositivi magnetocalorici (semi-passivi).

Un accoppiatore radiativo opera trasmettendo il calore da una parete calda ad una fredda per via radiativa. Tra le due superfici è interposto un disco rotante a riflettanza variabile, responsabile della modulazione della resistenza termica. Il dispositivo è ovviamente attivo ovvero richiede una alimentazione esterna; ed è quindi primariamente pensato per le sperimentazioni di laboratorio dato che consentirà una facile modificazione della frequenza di modulazione, utile per validare sperimentalmente il modello.

I "buzzer" termici sono invece dispositivi termomeccanici passivi, che operano senza consumare potenza. Due conduttori termici solidali rispettivamente alla parete calda della sorgente primaria di calore e al lato caldo del TEG sono inizialmente poste in prossimità l'una dell'altra ma non in contatto. La conduttanza termica del circuito è quindi virtualmente nulla. Il riscaldamento del conduttore solidale alla parete calda ne determina la dilatazione, fino a porlo in contatti fisico con il secondo conduttore. La chiusura della catena termica causa il raffreddamento del primo conduttore, che si contrae rompendo il contatto con il secondo conduttore. Il ciclo si ripete con una frequenza numericamente determinata dipendere dai coefficienti di dilatazione dei due conduttori e dalla geometria del sistema. Si osservi che, anche se la resistenza termica del circuito ha un andamento ad onda quadra (on/off), la variazione di temperatura al lato del modulatore in contatto con il lato caldo del TEG presenta oscillazioni di temperatura quasi-sinusoidali e comunque non discontinue a causa della capacità termica finita del secondo conduttore.

I modulatori magnetotermici sfruttano invece l'omonimo effetto. Nello schema di funzionamento passivo (23), essi sfruttano la transizione ferro/paramagnetica di un idoneo materiale. In modo analogo al "buzzer" termico, la barra ferro/paramagnetica è posta tra le espansioni di un magnete ed è in contatto con la parete calda. Ciò porta al riscaldamento di una parte della barra la cui temperatura supera la temperatura di Curie. Ciò genera uno sbilanciamento delle forze agenti sulla barra stessa che trasla normalmente alle linee di forza del campo magnetico. Il contatto termico viene quindi interrotto e la barra dissipa il calore verso il lato caldo del TEG, riportandosi nella posizione iniziale. Anche se il sistema è costruttivamente più complesso del "buzzer", le sue modalità di funzionamento lo rendono competitivo in termini di affidabilità e tempo di vita.

### 7.4 Riferimenti

1. D. Beretta *et al.*, *Materials Science and Engineering R: Reports*. **138**, 210–255 (2019).
2. Novikov. I.I., *J. Nuclear Energy II*. **7**, 125–128 (1958).
3. F. L. Curzon, B. Ahlborn, *American Journal of Physics*. **43**, 22–24 (1975).

4. Paul E. Gray, *The Dynamic Behavior of Thermoelectric Devices* (The Technology Press of the MIT & J. Wiley & Sons, Boston & New York, 1960).
5. G. Min, *AIP Conference Proceedings*. **1449**, 447–449 (2012).
6. I. S. McKay, E. N. Wang, *Energy*. **57**, 632–640 (2013).
7. L. Chen, J. Lee, *Applied Energy*. **150**, 138–149 (2015).
8. P. E. Ruiz-Ortega, M. A. Olivares-Robles, *Entropy*. **21**, 30226 (2019).
9. S. Asaadi, S. Khalilarya, S. Jafarmadar, *Energy Conversion and Management*. **167**, 102 (2018).
10. G. Ben Abdallah, S. Besbes, H. Ben Aissia, J. Jay, *Applied Thermal Engineering*. **158**, 113728 (2019).
11. M. Haras, M. Markiewicz, S. Monfray, T. Skotnicki, *Nano Energy*. **68**, 104204 (2020).
12. L. Kong, J. Yu, H. Zhu, Q. Zhu, Q. Yan, *Energy*. **261**, 125175 (2022).
13. G. J. Snyder, J. P. Fleurial, T. Caillat, R. Yang, G. Chen, *Journal of Applied Physics*. **92**, 1564–1569 (2002).
14. J. Stockholm *et al.*, *Materials Today: Proceedings*. **2**, 744–750 (2015).
15. M. Otsuka, Y. Hasegawa, T. Arisaka, R. Shinozaki, H. Morita, *Applied Physics Express*. **10** (2017), 12444.
16. Y. Cai, A. Rezanian, F. Deng, L. Rosendahl, J. Chen, *Energy Conversion and Management*. **245**, 114561 (2021).
17. E. Yousefi, A. A. Nejad, A. Rezanian, *Energy*. **256**, 124644 (2022).
18. Y. Yan, J. A. Malen, *Energy and Environmental Science*. **6**, 1267–1273 (2013).
19. D. Abarbanel, J. Maassen, *Journal of Applied Physics*. **121**, 5567 (2017).
20. G. Contento, B. Lorenzi, A. Rizzo, D. Narducci, *Energy*. **131**, 230–238 (2017).
21. T. Schmiedl, U. Seifert, *EPL (Europhysics Letters)*. **81**, 20003 (2008).
22. A. F. Ioffe, *Semiconductor thermoelements and thermo-electric cooling* (Infosearch, 1960).
23. R. A. Kishore, S. Priya, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **81**, 33–44 (2018).

## 8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

La Linea di Attività 1.5 non ha richiesto consulenze.

## 9 Pubblicazioni scientifiche

Elenco delle pubblicazioni scientifiche eventualmente risultanti dall'attività svolta (2022-2023)

C. Artini, G. Pennelli, P. Graziosi., Z. Li, N. Neophytou, C. Melis, L. Colombo, E. Isotta, K. Lohani, P. Scardi, A. Castellero, M. Baricco, M. Palumbo, S. Casassa, L. Maschi, M. Pani, G. Latronico, P. Mele, F. Di Benedetto, G. Contento, M.F. De Riccardis, R. Fucci, B. Palazzo, A. Rizzo, V. Demontis, D. Prete, M. Isram, F. Rossella, A. Ferrario, A. Miozzo, S. Boldrini, E. Dimaggio, M. Franzini, S. Galliano, C. Barolo, S. Mardi, A. Reale, B. Lorenzi, D. Narducci, V. Trifiletti, S. Milita, A. Bellucci and D.M. Trucchi. Roadmap on thermoelectricity. *Nanotechnology*, 34(29) (2023) 292001.

D. Narducci and F. Giulio, 'Recent Advances on Thermoelectric Silicon for Low-Temperature Applications', *Materials*, 15(3) (2022) 1214.

## 10 Eventi di disseminazione

Lista degli eventi di disseminazione eventualmente scaturiti dall'attività svolta (2022-2023)

Narducci, D. (2023). Enhancing Thermoelectric Generator Efficiency: Time-Modulated Temperature Difference Increases Efficiency at Maximum Power by Nearly Threefold. Intervento su invito presentato a: ICT 2023 Annual International Conference on Thermoelectrics – June 21 - 25, 2023, Seattle. USA.

Narducci, D. (2023). Dynamic Thermoelectric Generators: Increased Efficiency at Maximum Power by Modulation of Heat Fluxes. Intervento presentato a: ECT 2023 Annual European Conference on Thermoelectrics – Sept. 17 - 21, 2023, Prague. Czech Republic.

Narducci, D. (2023). Time Modulation of the Temperature Gradient Doubles the Efficiency at Maximum Power of Thermoelectric Generators. Intervento presentato a: Giornate sulla Termoelettricità – 13 -14 Febbraio 2023, Trento.