

DESCRIZIONE TECNICA

I materiali termoelettrici (TE) sono in grado di generare elettricità a partire da una fonte di energia termica o di essere usati come pompe di calore allo stato solido.

Una diffusione di questa tecnologia su larga scala è legata all'identificazione e allo sviluppo di materiali caratterizzati da una efficienza termodinamica superiore a quella dei materiali attualmente disponibili, per i quali si attesta attualmente a circa il 15% del limite di Carnot [1]. Vincoli di carattere tecnologico (difficoltà di disaccoppiare la conduzione elettrica da quella termica) sono all'origine della limitata efficienza e dei costi elevati dei dispositivi oggi disponibili, e hanno largamente circoscritto la tecnologia ad applicazioni aerospaziali complesse quali i Radioisotope Thermoelectric Generators [2]. La tecnologia TE è infatti caratterizzata da svariate proprietà appetibili per applicazioni nei settori automotive, aeronautico, militare, meccatronico ecc.: i generatori sono scalabili da dimensioni micrometriche fino a dimensioni tali da essere interfacciabili con impianti industriali, possono essere leggeri, e possono in linea di principio operare in condizioni estreme per tempi lunghi (ad es. sulla scala dei decenni).

Il progresso delle tecniche di sintesi di nuovi materiali, e in particolare di nuovi nanomateriali, oggi offre opportunità inedite per lo sviluppo di una generazione di dispositivi TE più efficienti, basati su materiali con proprietà non raggiungibili con i composti "bulk" che sono stati studiati negli ultimi decenni [3].

Un'ulteriore direzione di sviluppo è costituita dallo studio di nuovi materiali TE di natura polimerica, che potrebbero offrire dispositivi TE a basso costo e meccanicamente flessibili [4], interfacciabili in prospettiva con applicazioni domotiche, dispositivi biomedicali e sensori indossabili e impiantabili. In parallelo, vari soggetti industriali, come nel caso delle case automobilistiche (fra cui Volkswagen, Volvo, Ford e BMW) [4-6], stanno concretamente esplorando la possibilità di integrare dispositivi TE in prodotti di largo consumo. Soluzioni esplorate in questa direzione includono sistemi di waste heat recovery su impianti industriali o su reti di sensori wireless, che acquisiranno un ruolo sempre più importante nei prossimi anni nelle nuove tecnologie IoT per smart factories, cities e communities. Studi sperimentali sono attualmente condotti per valutare le proprietà di energy harvesting anche su polimeri piroelettrici, in modo da integrare la conoscenza consolidata dell'effetto piroelettrico, recentemente dimostrata per harvesting di energia solare, all'utilizzo di polimeri piroelettrici flessibili, indossabili e utilizzabili per la realizzazione di dispositivi biomedici nonché per la fabbricazione di generatori per l'alimentazione di sensori biometrici che sfruttano il calore corporeo [11]. Recenti ricerche di settore valutano che il mercato mondiale della tecnologia TE crescerà dai 40 milioni di dollari nel 2014 a 950 milioni nel 2024 [7].

STATO DI AVANZAMENTO

Internazionale

La tecnologia di generazione TE rimane attualmente diffusa soprattutto in applicazioni di nicchia. A livello europeo sono nate negli ultimi anni nuove compagnie con un forte focus sulla tecnologia TE, in particolare per applicazioni di piccola scala. Fra queste si ricordano: la greenTEG in Svizzera (<http://www.greenteg.com/>) e la Micropelt in Germania (<http://www.micropelt.com/>). Sempre in ambito europeo, la tecnologia TE sta attraendo un significativo interesse nell'ambito automotive e varie case automobilistiche (Volkswagen, Volvo e BMW) stanno sviluppando generatori TE in grado di recuperare energia dal calore di scarto del motore, in sostituzione degli alternatori. Le stime attuali indicano che questa tecnologia porterà ad un risparmio del 3-5% nel consumo di carburante [7].

Su scala mondiale, in particolare negli Stati Uniti, lo sviluppo di sistemi TE risulta significativamente più avanzato e ha visto la fondazione di svariate nuove compagnie, anche in ambito di recupero energetico da impianti di scala industriale.

Nazionale

Le applicazioni di generazione di energia basata su dispositivi TE non si sono ancora sviluppate in Italia. Sono tuttavia presenti compagnie che operano nell'ambito della tecnologia TE, utilizzata per la realizzazione di pompe di calore, come nel caso dei prodotti nautici della Peltech SRL (<http://www.peltech.com/>).

■ TRL (TECHNOLOGY READINESS LEVEL)

Sistemi TE per il recupero di energia termica da impianti industriali: TRL9, prodotti commerciali esistenti.

Sistemi TE per il settore automobilistico: TRL7, prototipi dimostrati da varie case automobilistiche ma non ancora in produzione su larga scala.

Sono inoltre in via di sviluppo (TRL 3) sistemi TE basati su nuovi materiali/nanomateriali.

■ RELAZIONI CON LE FONTI ENERGETICHE

La tecnologia termoelettrica risulta particolarmente adatta all'energy harvesting, in particolare:

- Recupero di energia dal calore dissipato dai macchinari esistenti. In questo caso la tecnologia va ad impattare i consumi di qualsiasi fonte energetica primaria alimentanti i macchinari a cui viene associata. Nel caso dei motori a combustione interna, comporterebbe un risparmio di carburante di origine petrolifera
- Energia solare. I generatori TE possono essere associati al solare a concentrazione, in casi in cui la scalabilità della tecnologia TE si rivelasse conveniente rispetto alle tecnologie alternative in questo ambito
- Corpo umano. I generatori TE per l'alimentazione di sensori biometrici potrebbero alimentarsi utilizzando il calore prodotto dal corpo umano.

■ VERSATILITÀ (CAPACITÀ DI IMPATTARE SU PIÙ SETTORI)

La tecnologia TE, in quanto largamente scalabile e molto robusta, risulta estremamente versatile e ci si aspetta che possa avere un impatto su svariati ambiti che vanno al di là di quello prettamente energetico. In particolare:

- **Reti di sensori remoti.** Grazie al recente e significativo sviluppo dell'elettronica a basso consumo, risulta oggi prevedibile la realizzazione di sistemi di monitoraggio alimentati da piccoli generatori TE in grado di raccogliere energia da fonti di calore nell'ambiente. In questo ambito la tecnologia TE potrebbe essere particolarmente appetibile nei casi in cui sorgenti alternative non risultano disponibili (come per esempio l'energia solare) o in cui risulta difficile e/o non desiderabile dover sottoporre a manutenzione i sistemi di monitoraggio
- **Sensori biometrici/indossabili.** In maniera analoga al punto precedente, piccoli generatori TE potrebbero essere usati in un futuro prossimo per alimentare sensori biometrici che sfruttano il calore del corpo umano per la loro alimentazione
- **Refrigerazione/condizionamento/pompe di calore allo stato solido.** Nel caso in cui la tecnologia TE raggiungesse una efficienza adeguata, potrebbe essere utilizzata in applicazioni HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioning) di larga scala, che oggi esistono ma confinate a mercati di nicchia. Gli ambiti applicativi potrebbero coinvolgere ancora il settore automotive o anche altri prodotti di largo consumo. In questo caso il valore aggiunto della tecnologia TE risiede nel fatto di essere facilmente scalabile sulle esigenze della specifica applicazione e di non richiedere virtualmente nessun tipo di manutenzione.

■ POTENZIALE DI DIFFUSIONE IN AMBITO NAZIONALE

La tecnologia TE è relativamente poco correlata alle particolarità del territorio nazionale, in quanto il suo utilizzo più naturale consiste nel recupero di energia dal calore dissipato dai macchinari esistenti. In questo senso, la grande importanza del trasporto su gomma fornisce ampi spazi di miglioramento nell'efficienza energetica. Un possibile ulteriore impatto potrebbe verificarsi in connessione al recupero di energia da fonti di calore naturali (solare e geotermico) nei casi in cui le proprietà della tecnologia TE (per esempio la realizzazione di dispositivi di piccola scala) la rendono appetibile rispetto alle tecnologie convenzionalmente utilizzate in questi ambiti.

■ IMPATTO E SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE

Come per tutti i generatori di energia rinnovabile, l'impatto ambientale dei dispositivi TE consiste soprattutto nella loro produzione ed eventuale smaltimento. Allo stato attuale alcuni materiali TE operanti ad alta temperatura sono poco inquinanti, quali SiGe, integrati su piattaforme "C-MOS compatibile". Diversamente, vari materiali per applicazioni a temperature più vicine a quella ambientale contengono materiali rari e/o nocivi (BiTe, BiSe, PbTe, ecc.).

Durante la loro vita operativa, i dispositivi TE non hanno nessun impatto inquinante e al contrario possono aumentare l'efficienza energetica dei macchinari esistenti, come per esempio nel caso dell'adozione di un generatore TE in sostituzione dell'alternatore in una automobile.

Emissioni CO₂/MWh

Nessuna emissione di CO₂ durante la produzione di energia elettrica.

Emissioni CO₂/MWh evitate

Nel caso dei veicoli a motore, si prevede che l'adozione di sistemi TE per il recupero dell'energia dal calore disperso dai motori a combustione interna porterà ad un risparmio di carburante fra il 3 e il 5% [8]. Considerato che 1 MWh di energia termica corrisponde alla combustione di circa 75 kg di combustibile, si può stimare un risparmio di 2,3-3,8 kg di carburante e una emissione evitata di circa 7-12 kg CO₂ per ogni MWh.

EFFICIENZA, TEMPO DI VITA E RENDIMENTO PREVISTI

Le efficienze attuali dei dispositivi TE variano molto con le applicazioni e le condizioni di operazione. Limitandosi al caso dei generatori TE per sostituire gli alternatori nei settore dei trasporti, le attuali previsioni sono che questa tecnologia porterà ad un risparmio di carburante stimato fra il 3 e il 5% [7]. Se quando applicata universalmente ai veicoli a combustione interna circolanti, questa transizione tecnologica comporterà una riduzione nel consumo di carburante in Italia, considerando un consumo annuo dell'ordine dei 30-40 milioni di tonnellate di benzina e gasolio [10] di 1-2 milioni di tonnellate all'anno, corrispondenti a: (i) un risparmio energetico di 15-30TWh di energia termica annua; (ii) una potenza termica media non consumata, di 1,5-3,0 GW; (iii) una quantità di CO₂ non emessa di 3-6 milioni di tonnellate annui.

I tempi di vita attesi sono molto lunghi in quanto i dispositivi non contengono parti in movimento e sono generalmente molto robusti. Le statistiche su prodotti di largo consumo, che stanno emergendo solo di recente, restano scarse. Tuttavia, i tempi di vita si possono estendere sulla scala dei vari decenni. Un caso esemplare è costituito dal generatore TE in SiGe che alimenta la sonda Voyager 1, che attualmente si trova a circa 20 miliardi di chilometri dalla Terra: il suo generatore TE è in operazione nello spazio da quasi 40 anni e si prevede smetterà di funzionare intorno al 2025, solo per esaurimento della fonte di calore nucleare con cui è a stretto contatto. Questi parametri rendono particolarmente interessante la tecnologia in riferimento ai prossimi sviluppi attesi nel settore spaziale a livello Italiano ed Europeo.

PAYBACK TECNOLOGICO, DI INVESTIMENTO E DI OPERATION AND MAINTENANCE PREVISTO

I costi di investimenti dipendono essenzialmente dalla tecnologia utilizzata. Dispositivi basati su fibre polimeriche hanno costi ridotti mentre dispositivi a stato solido hanno costi più elevati poichè per la loro sintesi necessitano di tecnologie più costose.

PRINCIPALI OSTACOLI ALLO SVILUPPO

I principali ostacoli allo sviluppo della tecnologia TE sono: (i) know-how all'ingresso per cui è necessario innescare una filiera di ricerca e produttiva efficace; (ii) l'efficienza limitata degli attuali convertitori; (iii) il costo e la tossicità di alcuni dei materiali utilizzati come elementi attivi. In generale, la crescita della infrastruttura produttiva in Italia risulta più lenta che in altre parti del mondo, come per esempio in nord Europa e negli Stati Uniti.

POTENZIALITÀ DI SVILUPPO TECNOLOGICO IN AMBITO NAZIONALE

Si riscontra a livello nazionale la presenza di competenze diffuse di ricerca di altissimo livello. Allo stesso tempo, l'ampia presenza di soggetti produttivi e distretti industriali nei settori della meccatronica, dell'aerospazio, e dell'automotive, e dei relativi indotti, consentono di stimare un impatto potenziale sul PIL significativo qualora si riuscisse a collegare i soggetti di ricerca ed aziendali direttamente interessati allo sviluppo della tecnologia TE.

POSSIBILI RICADUTE PER IL SISTEMA INDUSTRIALE, DEI TRASPORTI, RESIDENZIALE E NEL TERZIARIO

Sistema industriale: recupero di energia dal calore di scarto. Vantaggio sta nella flessibilità della tecnologia (scalabile, poca manutenzione)

Trasporti: dove l'utilizzo dei dispositivi TE hanno un grosso impatto. Case automobilistiche come Volkswagen, Volvo, Ford e BMW stanno concretamente esplorando la possibilità di integrare dispositivi TE in prodotti di largo consumo

Residenziale: diversamente dai casi precedenti andiamo sull'ipotetico. Se l'efficienza aumenta si può pensare a sistemi a pompe di calore allo stato solido per il condizionamento degli ambienti e per la refrigerazione

Terziario: nuove applicazioni come reti di sensori, sensori indossabili, ecc.

MAGGIORI ATTORI ITALIANI COINVOLTI

Utilizzo della tecnologia

Ad oggi la tecnologia TE viene utilizzata per la realizzazione di pompe di calore allo stato solido, ad es. per il settore nautico.

Sviluppo della tecnologia

- Microelettronica
- Meccatronica
- Aeronautico/aerospaziale.

ECCELLENZE IN TERRITORIO NAZIONALE

L'Italia presenta diverse eccellenze in ambito TE:

- **Scuola Normale Superiore:** studio sperimentale delle proprietà termoelettriche di materiali nanostrutturati
- **Università del Salento:** studio sperimentale di nuovi materiali TE di natura polimerica, che potrebbero offrire dispositivi TE a basso costo e meccanicamente flessibili
- **Laboratorio LNESS** (Politecnico di Milano e IFN-CNR): Progettazione e la realizzazione di super-reticoli ad alto contenuto di Ge integrati su silicio e loro nano-strutturazione per bloccare lo scattering della diffusione dei fononi acustici a basse lunghezze d'onda
- **Università di Como Insubria:** teoria delle proprietà termoelettriche dei sistemi interagenti
- **Università di Genova:** sintesi e caratterizzazione di materiali termoelettrici
- **CNR:** oltre ad una intensa attività di studio e ottimizzazione di materiali a matrice nanometrica polimerici e convenzionali, progetta e realizza i relativi moduli e ne caratterizza le proprietà fondamentali e tecnologiche.

Da segnalare come di recente è stata costituita anche l'Associazione Italiana di Termoelettricità, che vede personale CNR nel suo direttivo, volta a diffondere quanto possibile la tecnologia e a creare una sinergia tra le competenze nazionali in queste tematiche anche al fine di ottimizzare la ricerca nel settore e accedere a finanziamenti esterni.

BEST PRACTICES

Impianti industriali: da pochi anni sono disponibili dispositivi per il recupero energetico su scala industriale, prodotti da compagnie statunitensi come la Perpetua (<http://perpetuapower.com/>) e la Alphabet energy (<http://www.alphabetenergy.com/>).
Settore automobilistico: varie case automobilistiche fra cui BMW, Volkswagen, Ford e Volvo hanno dimostrato prototipi in cui l'alternatore è sostituito da un generatore TE in grado di recuperare energia scambiando calore fra le parti calde del motore e l'ambiente circostante.

BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO

- [1] G. Jeffrey Snyder and Eric S.Torberer, "Complex thermoelectric materials", Nature Materials 7, 105 (2008). DOI: 10.1038/nmat2090
- [2] <https://solarsystem.nasa.gov/rps/rtg.cfm>
- [3] M. S. Dresselhaus, G. Chen, M. Y. Tang, R. G. Yang, H. Lee D. Z. Wang, Z. F. Ren, J.-P. Fleurial and P. Gogna, Adv.Mater. 19, 1043 (2007).
- [4] Presentazione al DoE Thermoelectric Applications Workshop, San Diego 2011. "Overview of Ford's Thermoelectric Program", <http://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f13/maranville.pdf>
- [5] Presentazione al DoE Thermoelectric Applications Workshop, San Diego 2011. "Efficient and Dynamic: the BMW Group roadmap for the application of thermoelectric generators" http://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f13/eder_0.pdf
- [6] Report GenTherm 2014 "Thermoelectric Waste Heat Recovery Program for Passenger Vehicles" http://energy.gov/sites/prod/files/2014/07/f17/ace080_barnhart_2014_o.pdf
- [7] Ricerca di mercato della IDTechEx. "Thermoelectric Energy Harvesting 2014-2024: Devices, Applications, Opportunities", November 2015, <http://www.researchandmarkets.com/research/36dxkm/thermoelectric>
- [8] R. Venkatasubramanian et al., 'Thin-film thermoelectric devices with high room-temperature figure of merit', Nature 413, 597 (2001)
- [9] D.M. Rowe (Ed.), 'Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano' CRC Taylor and Francis (2006)]
- [10] RAEE2011 – Rapporto Annuale Efficienza Energetica 2013 (Enea) <http://www.enea.it/it/pubblicazioni/pdf-volumi/RAEE20132.pdf>.
- [11] L. Battista, L. Mecozzi, S. Coppola, V. Vespini, S. Grilli, P. Ferraro, "Graphene and carbon black nanocomposite polymer absorbers for a pyro-electric solar energy harvesting device based on LiNbO3 crystals" Applied Energy 136, 357-362 (2014).