

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria dell'Energia

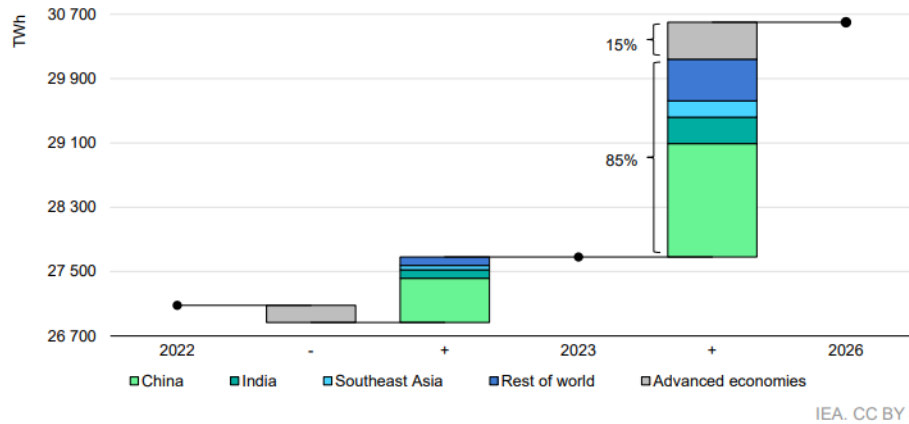
Relazione per la prova finale
«Analisi Delle Applicazioni Dei Fenomeni
Termoelettrici »

Tutor universitario: Prof. Angelo Zarrella

Laureando: *Elia Gonzati 2012785*

Padova, 7/03/2024

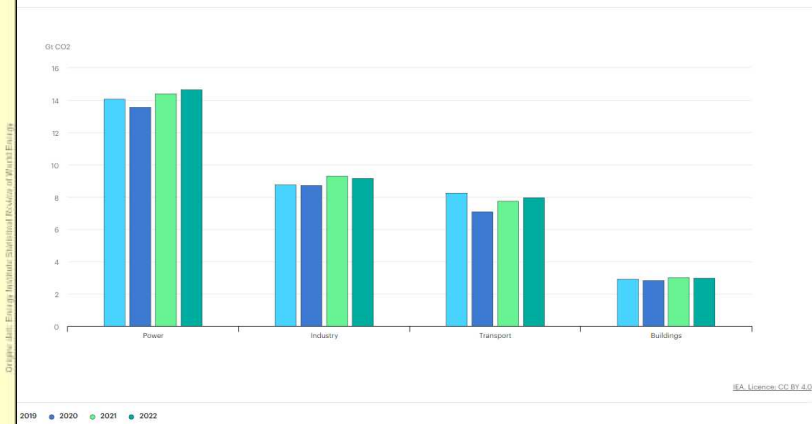
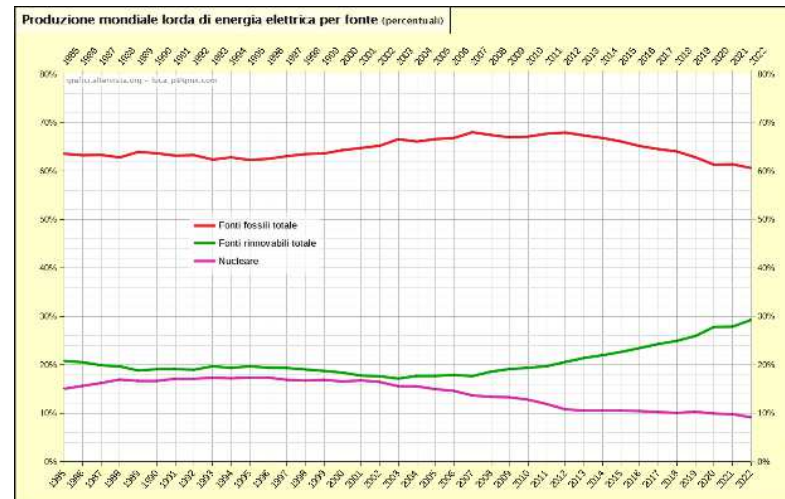
Year-on-year change in electricity demand by region, 2022-2026



La domanda globale di elettricità è prevista aumentare ad un ritmo più veloce nei prossimi tre anni, crescendo in media del 3.4% ogni anno, fino al 2026. Questo aumento sarà guidato da una notevole crescita economica, che contribuirà ad incrementare la richiesta della domanda sia nelle economie avanzate che in quelle emergenti.

La quota delle energie rinnovabili nella generazione di elettricità è prevista aumentare dal 30% nel 2023 al 37% nel 2026.

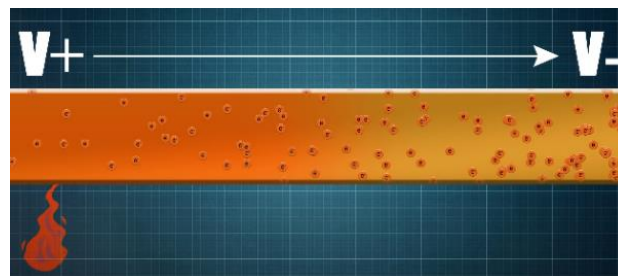
Le fonti fossili ricoprono tutt'oggi una percentuale elevata per la produzione mondiale lorda di energia elettrica, il settore con la maggiore produzione di emissioni di CO₂, nel 2022, è stato quello della generazione di elettricità.



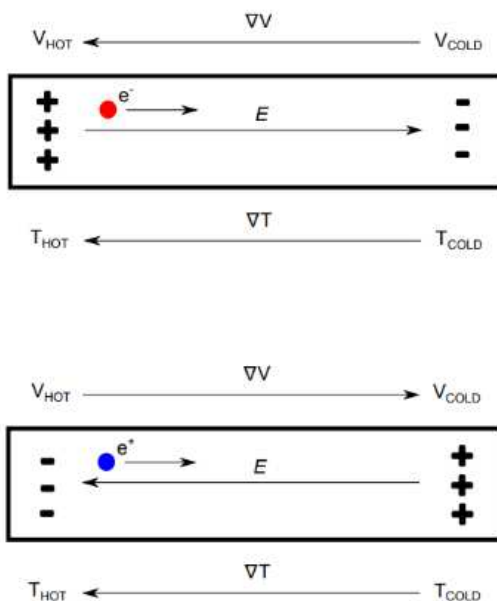
Questa relazione ha lo scopo di illustrare il potenziale ruolo chiave della termoelettricità nel facilitare la transizione verso un futuro sostenibile. Per garantire una completa ed esaustiva interpretazione del ruolo della termoelettricità, è necessario:

1. Analizzare i fenomeni termoelettrici, per fornire la base teorica necessaria a comprendere le potenziali applicazioni.
2. Esaminare il parametro chiave che definisce l'efficienza dei materiali termoelettrici, al fine di comprendere le variabili che lo influenzano e le relative sfide da affrontare.
3. Investigare le possibili applicazioni di tali dispositivi, stabilendo gli aspetti positivi e quelli negativi, fornendo una visione completa della loro potenzialità e versatilità.
4. Presentare una serie di esperimenti e i relativi dati ottenuti, dimostrando come i dispositivi termoelettrici possano ottimizzare le risorse.
5. Affrontare il tema della sostenibilità ambientale relativo all'intero processo di vita dei dispositivi termoelettrici, per comprendere il costo di produzione e l'impatto sull'ambiente.

Formazione, in ogni materiale **conduttore**, di una differenza di potenziale, indicata come ΔV , a causa della migrazione di portatori di carica in risposta ad un gradiente termico ∇T .



$$\alpha = -\frac{\Delta V}{\Delta T} = \frac{E}{\nabla T} \quad (1.1)$$



Il segno del coefficiente di Seebeck nei materiali **semiconduttori** è strettamente legato alla tipologia dei portatori di carica:

- nei semiconduttori di tipo p : α è positivo;
- nei semiconduttori di tipo n: α è negativo.



Se A e B sono rispettivamente semiconduttori di tipo p e n, α_A è positivo mentre α_B è negativo, di conseguenza: $\Delta V = (\alpha_A - \alpha_B) \cdot \Delta T$

Considerando un sistema di particelle soggetto ad un campo elettrico, si somma al potenziale chimico l'energia potenziale di una particella di carica q entrante nel sistema; la condizione di equilibrio è data da: $\mu + q\phi = \text{cost}$ (potenziale elettrochimico).

$$E = -d\phi / dx$$

Si considera che il potenziale elettrochimico nel conduttore rimanga costante: $d\mu/dx + q d\phi/dx = 0 \rightarrow d\mu/dx = qE$

Il potenziale chimico varia da punto a punto e dipende dalla temperatura locale: $d\mu/dx = (d\mu/dT) (dT/dx) = (d\mu/dT) \nabla T \rightarrow (d\mu/dT) \nabla T = qE$

Il coefficiente Seebeck è esprimibile attraverso la (1.1): $\alpha = \frac{E}{\nabla T} = \frac{1}{q} (d\mu/dT)$

Per i metalli: $\mu(T = 0) = e_f = \frac{2}{3} \frac{4}{3} \pi^3 h^2 n^{2/3} \rightarrow \mu(T) = e_f - \frac{(k_B T)^2 \pi^2}{6 e_f} \rightarrow \alpha = -\frac{k_B^2 \pi^2 T}{3 e e_f}$

Nei semiconduttori μ dipende da vari fattori, inclusa la concentrazione dei portatori di carica:

$$n = n_0 \cdot e^{-\frac{E_a}{kT}} \quad \text{Equazione di Arrhenius}$$

Sostanza	Proprietà elettriche	Coefficiente di Seebeck ($\mu\text{V/K}$)
Bismuto	Metallo	-73
Costantana	Metallo	-35
Nichel	Metallo	-15
Platino	Metallo	0
Alluminio	Metallo	3.5
Germanio	Semiconduttore	300
Silicio	Semiconduttore	440
Tellurio	Semiconduttore	500
Selenio	Semiconduttore	900

Quando viene indotta la circolazione di corrente attraverso un circuito chiuso formato da due materiali diversi A e B, a regime termico stabilizzato, una delle due giunzioni emette calore mentre l'altra lo assorbe.

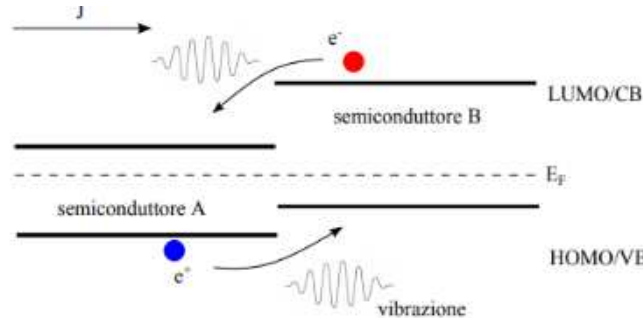
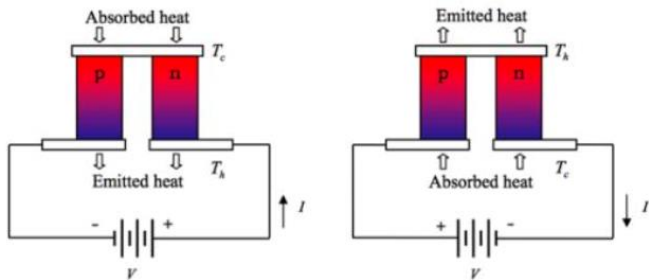
$$\rightarrow \Pi_{AB} = (\alpha_A - \alpha_B) \cdot T = \alpha_{AB} \cdot T$$



Energia assorbita dalla giunzione calda: $Q_{AB} = \Pi_{AB}(T + \Delta T)$
Energia assorbita dalla giunzione fredda: $Q_{AB} = -\Pi_{AB}(T)$



Invertendo la direzione della corrente, il comportamento termico in corrispondenza delle due giunzioni si modifica.



Quando la corrente si sposta da n a p, gli elettroni (della zona calda), tendono a raggiungere l'equilibrio mediante il "rilassamento" ad energie inferiori, mentre le lacune termalizzano a livelli di energia più alta.

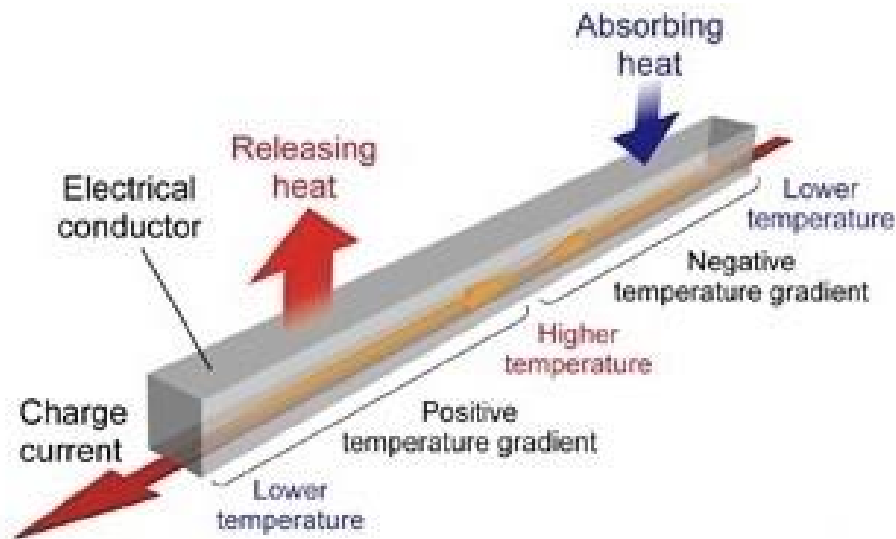
La potenza termica scambiata risulta essere: $|q| = \frac{dQ}{dt} = \Pi_{AB}(T) \cdot I = (\Pi_A - \Pi_B) \cdot I = (\Pi_A - \Pi_B) \frac{dq}{dt}$

Quando un materiale conduttore presenta un gradiente termico alle estremità e viene indotta la circolazione di corrente di intensità pari ad I , si verifica un assorbimento o emissione di calore, in funzione del prodotto tra la corrente e il gradiente di temperatura e il segno del coefficiente di Thomson. In caso di emissione di energia termica, il conduttore cede calore all'ambiente e tale perdita si aggiunge all'effetto Joule.

$$\rightarrow P = \frac{dQ}{dt} = RI^2 - \tau(T)IVT$$

$$\downarrow$$

$$\tau = T \frac{d\alpha}{dT}$$



Nei materiali con coefficiente positivo, quando la corrente presenta la stessa direzione del gradiente di temperatura, si registra un assorbimento di calore; emissione qualora la corrente transiti nella direzione opposta.

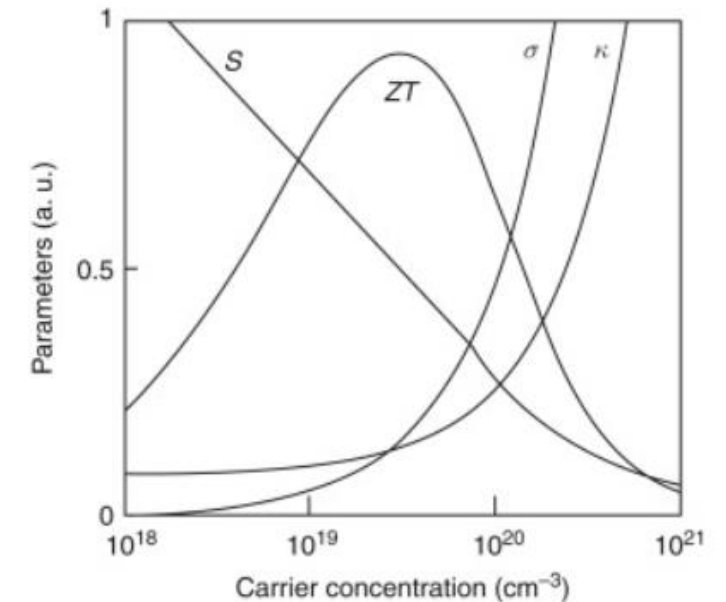
L'efficacia dei materiali termoelettrici si basa sulla loro abilità nel convertire l'energia termica in energia elettrica, questa capacità è quantificata attraverso la figura di merito ZT, definita dall'equazione:



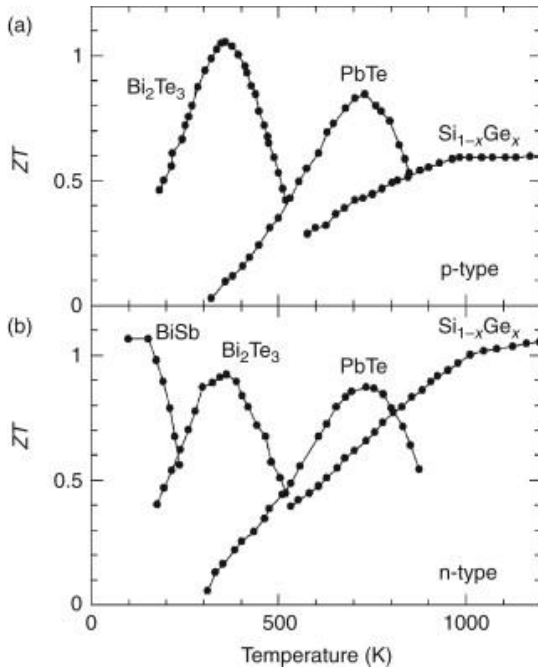
$$ZT = \frac{\sigma \alpha^2 T}{\kappa}$$



$$\alpha \propto -\ln(n) \quad \sigma \propto n \quad k_e \propto \sigma$$



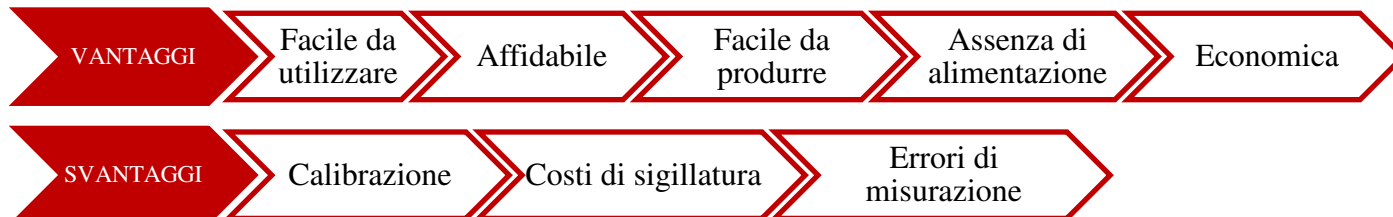
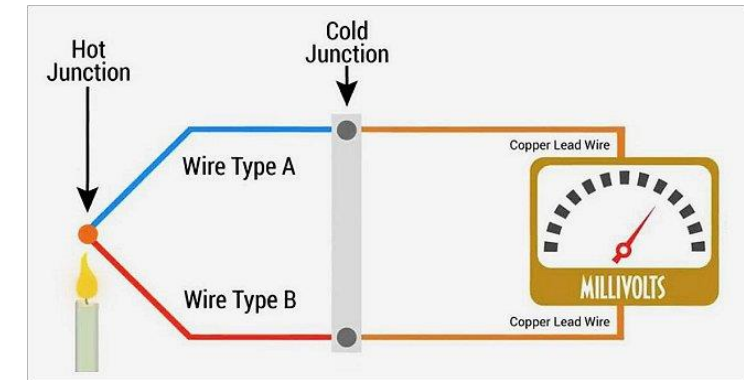
Attraverso il drogaggio dei materiali semiconduttori vengono introdotte delle impurità, la cui concentrazione è più piccola rispetto alla concentrazione degli atomi presenti, formando un gas di elettroni liberi simile ai metalli, ma mantenendo l'energia di Fermi ridotta.



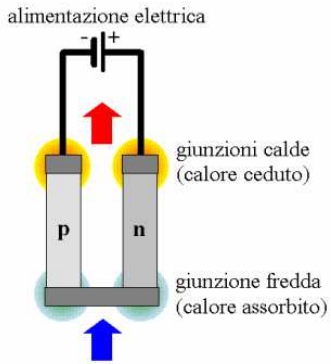
La termocoppia è un trasduttore di temperatura il cui funzionamento si basa sull'effetto Seebeck.



Sono caratterizzate da due materiali conduttori diversi saldati tra loro ad un'estremità, detta giunzione calda; mentre l'altra, detta giunzione fredda, viene mantenuta alla temperatura di riferimento.



Termocoppia	Tipo	Elemento positivo	Elemento negativo	Temperatura massima di utilizzo [°C]	Atmosfera consigliata
Cu/Costantana	T	Cu	Costantana (55% Cu + 45% Ni)	370	Ossidante, riducente, inerte, vuoto
Fe/Costantana	J	Fe	Costantana (55% Cu + 45% Ni)	750	Ossidante, riducente, inerte, vuoto
Nichel-Cromo/ Nichel-Alluminio	K	Nichel-Cromo (90% Ni + 10% Cr)	Nichel-Alluminio (95% Ni + 2% Al + 2% Mn)	1250	Ossidante, inerte
Pt + 10 Rh/Pt	S	90% Pt + 10% Rh	Pt	1500	Ossidante
Pt + 13 Rh/Pt	R	87% Pt + 13% Rh	Pt	1500	Ossidante
Pt + 30 Rh/Pt + 6 Rh	B	70% Pt + 30% Rh	94% Pt + 6% Rh	1700	Ossidante



Il funzionamento TEC sfrutta l'effetto Peltier al fine di assorbire calore.

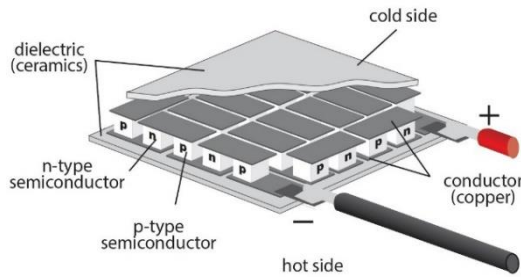


$$q_{abs} = (\alpha_p - \alpha_n) \cdot T_{cs} \cdot I - K \cdot \Delta T - \frac{1}{2} \cdot R \cdot I^2$$

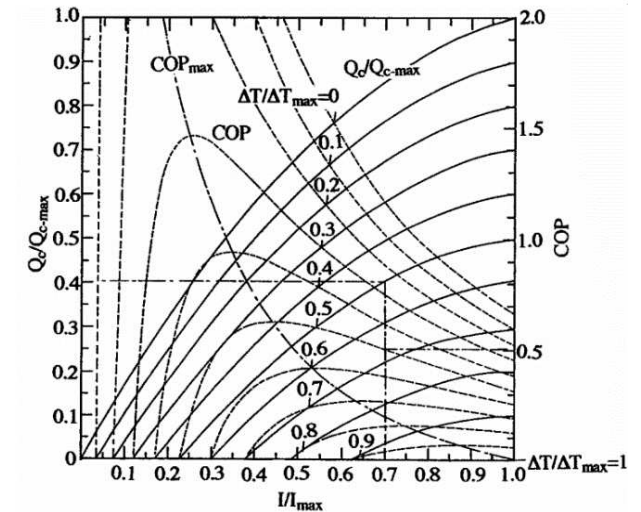
$$\Delta V = (\alpha_p - \alpha_n) \cdot \Delta T + RI$$

$$P = \Delta V \cdot I$$

$$\varepsilon = \frac{q_{abs}}{P} = \frac{(\alpha_p - \alpha_n) \cdot T_{cs} \cdot I - K \cdot \Delta T - \frac{1}{2} \cdot R \cdot I^2}{(\alpha_p - \alpha_n) \cdot \Delta T \cdot I + RI^2}$$

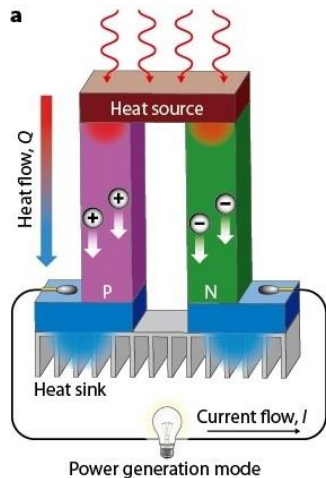


Il modulo termoelettrico è costituito da N coppie termoelettriche connesse tra loro mediante piastrine metalliche saldate alle estremità; inoltre, le coppie sono integrate tra due piastre di materiale isolante.



$$q_{abs} = N (q_p - q_c - q_j) \Delta T_{max} = T_{hs} - \left(\frac{\sqrt{1 + 2zT_{hs}} - 1}{Z} \right) I_{max} = \frac{KG}{\alpha_{pn}} (\sqrt{1 + 2zT_{hs}} - 1)$$

VANTAGGI	Componenti non mobili	No Fluidi refrigeranti	Affidabile	Salvaguardia ambiente	Modulabili	Dimensioni ridotte
SVANTAGGI	Rischio guasti	Basso Rendimento	Condensa			



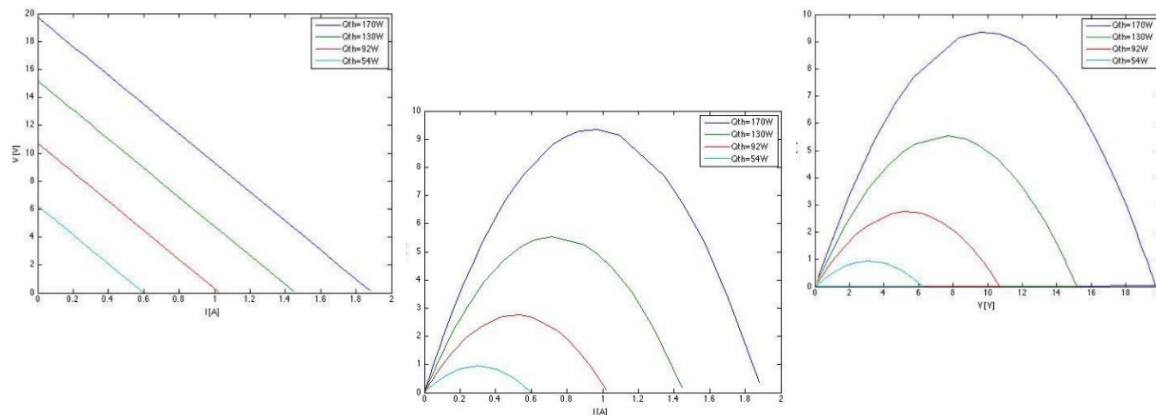
Il funzionamento TEG sfrutta l'effetto Seebeck per generare una differenza di potenziale al fine di alimentare un certo carico elettrico.

$$q_p + K \cdot \Delta T = q_{abs} + \frac{1}{2} \cdot R \cdot I^2$$

$$\eta = \frac{P}{q_{abs}} = \frac{\Delta T}{T_{hs}} \cdot \frac{\frac{m}{m+1}}{1 + \frac{1}{Z} \cdot \frac{m+1}{T_{hs}} - \frac{\Delta T}{2T_{hs}} \cdot \frac{1}{m+1}}$$



www.dii.unipd.it

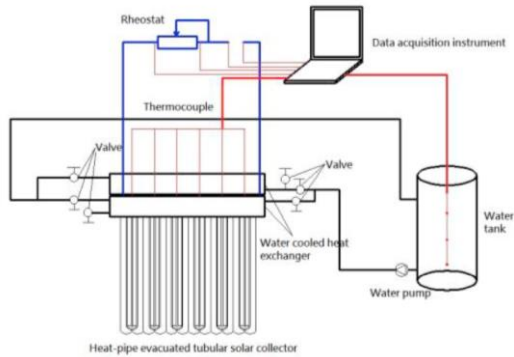


$$\eta = \frac{\Delta T}{T_{hs}} \frac{\frac{Nr}{R}}{\left(1 + \frac{Nr}{R}\right) - \frac{1}{2} \frac{\Delta T}{T_{hs}} + \frac{1}{2zTm} \cdot \left(1 + \frac{nr}{R}\right)^2 \cdot \left(1 + \frac{T_{cs}}{T_{hs}}\right)}$$

$$P = I \Delta V = N [(\alpha_{pn} I \Delta T)] - I^2 R$$

$$I = \frac{N \alpha_{pn} \Delta T}{R + r}$$

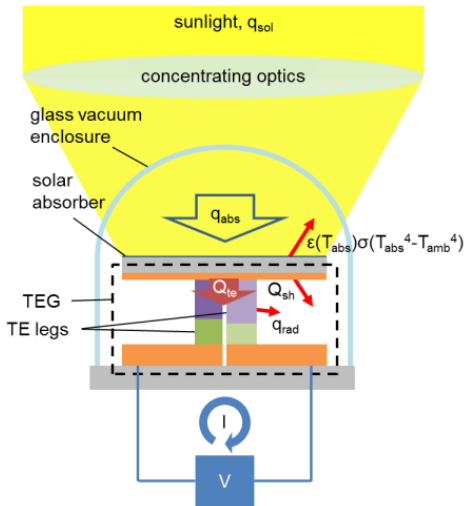
VANTAGGI	Componenti non mobili	Affidabile	Salvaguardia ambiente	Modulabili	Dimensioni ridotte
SVANTAGGI	Rischio guasti	Basso Rendimento	Condensa		



Il sistema STEG, composto da 10 tubi di calore in 10 tubi sottovuoto con 10 moduli TEG, può fornire 0,2036 kWh di energia elettrica.



Se 40 unità lavorassero secondo queste condizioni, per otto ore, con buona luce solare al giorno, potrebbe soddisfare il 50% dei requisiti energetici di una casa piccola, pari a 2 kWh.

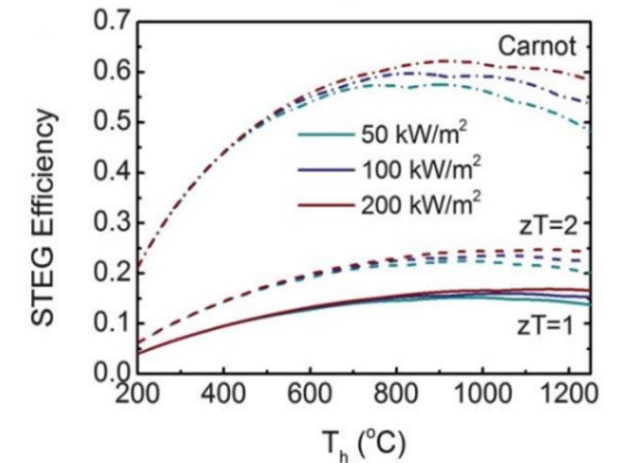


Lo STEG è caratterizzato da un concentratore ottico, da un assorbitore, con lo scopo di convertire la radiazione solare in calore e un sistema di raffreddamento nel lato freddo del TEG.

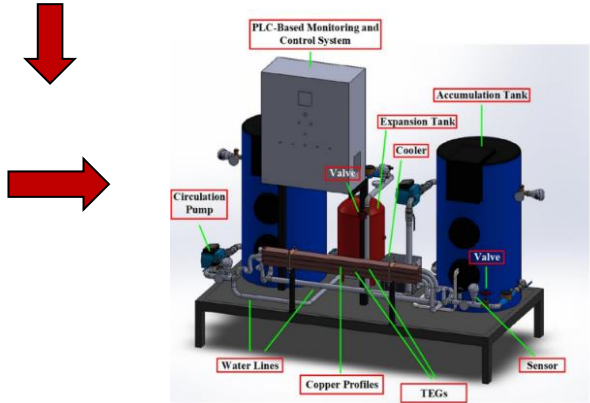
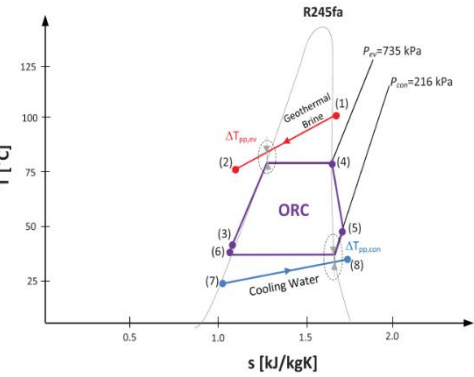
DNI = 211 kW/m², T_{assorbitore} = 600°C.



$$\eta = \eta_{opt} \eta_{abs} \eta_{teg} \eta_{aux} = 7.4\%$$



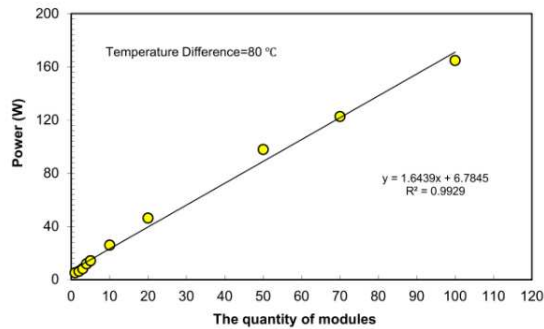
Accoppiamento dell' impianto geotermico con 48 dispositivi termoelettrici.



I dispositivi termoelettrici hanno presentato un'efficienza del 2.44%.

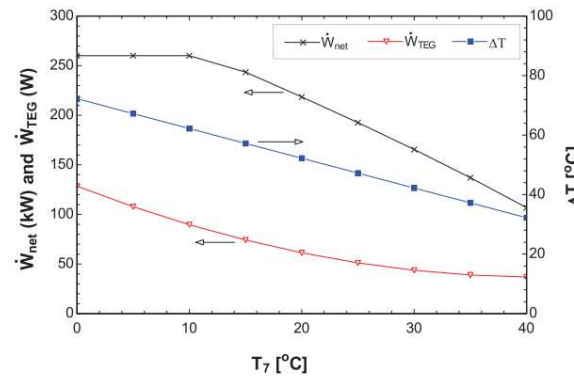
I valori di potenza in uscita dei TEG variano con la temperatura T2 (lato caldo) e con i valori di temperatura d'ingresso dell'acqua di raffreddamento T7 (lato freddo).

Circa 600 moduli sono necessari per un generatore termoelettrico da 1 kW.



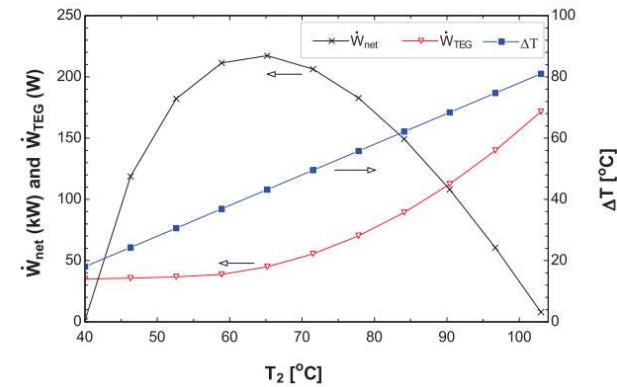
$$W_{TEG} = 84,29W \text{ con } \Delta T = 60,6^{\circ}C$$

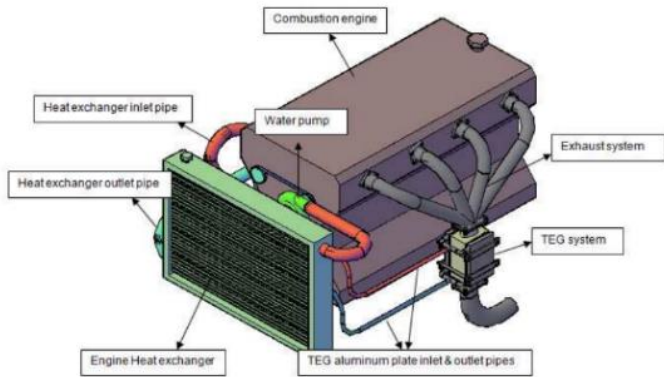
$$W_{net\ max} = 260\ kW$$



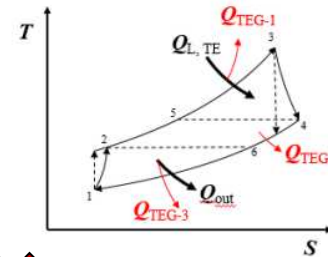
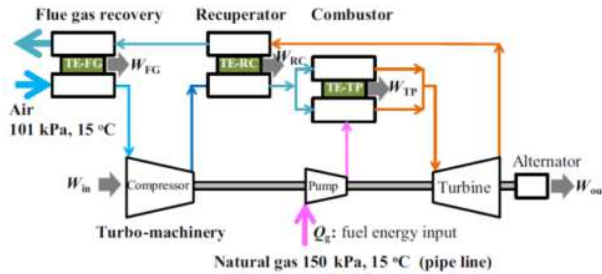
$$W_{net\ max} = 217,6\ kW$$

$$W_{TEG} = 43,42\ W \text{ con } \Delta T = 41,98^{\circ}C.$$





Se ZT fosse pari a 3, rispetto al livello attuale $ZT \sim 0,7$, le emissioni di CO₂ delle automobili verrebbero ridotte dallo 0,64% al 2,46%.

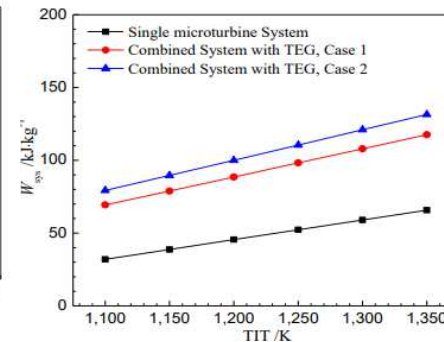
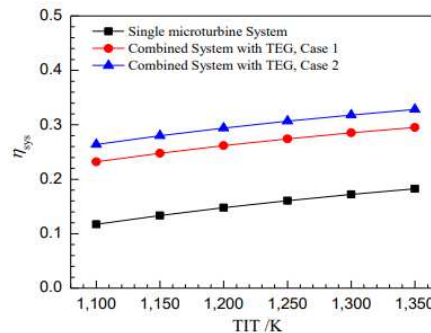


Sono stati presi in considerazione due casi:

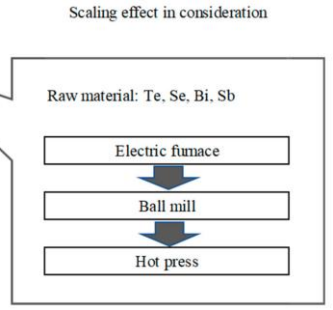
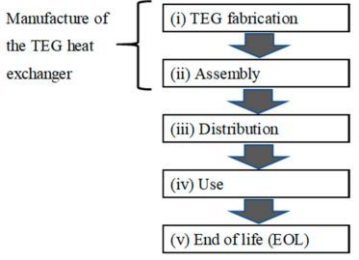
- Caso 1: il ZT per i tre TEG pari a 0,8, 1,2 e 1,2
- Caso 2: il ZT per i tre TEG pari a 1,0, 1,8 e 1,8

L'efficienza di generazione del singolo sistema aumenta dal 11,7% al 18,2% mentre l'efficienza del sistema combinato aumenta:

- dal 23,2% al 29,5% nelle condizioni del Caso 1
- dal 26,4% al 32,8% nelle condizioni del Caso 2.



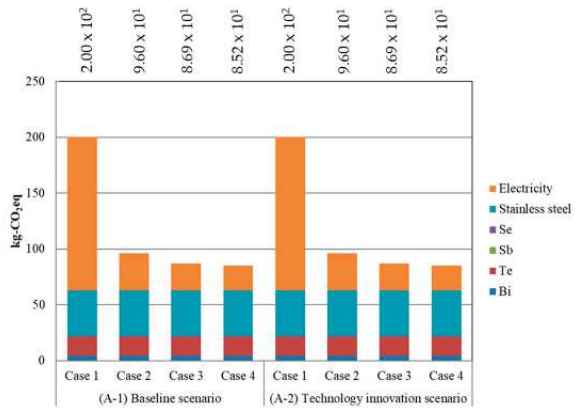
La potenza prodotta dal sistema combinato è 2-3 volte la potenza generata dal singolo sistema.



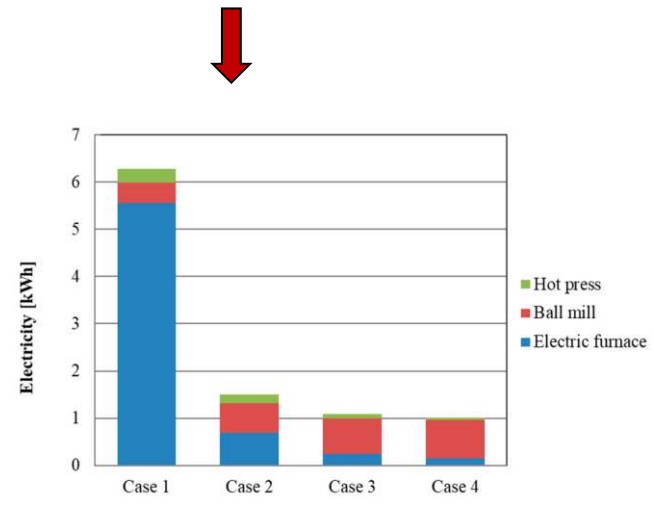
Il consumo energetico nel processo di fabbricazione viene calcolato tramite un metodo indiretto:

$$P = P_0 \left(\frac{S_x}{S_0} \right)^f$$

	Unit	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Electric furnace	€	0.011	1.000	10.000	30.000
Ball mill	€	0.011	1.000	10.000	30.000
Hot press	m ²	0.003	0.010	0.100	1.000



Il consumo di elettricità della fornace e della pressa diminuiscono all'aumentare della scala di produzione, mentre il consumo di elettricità del mulino a sfere aumenta.



Le emissioni di gas serra diminuiscono da 137,1 kg-CO₂ eq/kg nel Caso 1 a 22,1 kg-CO₂ eq/kg nel Caso 4

La termoelettricità rappresenta un importante risorsa nel campo di generazione di energia e refrigerazione senza emissioni; nonostante presenti ancora sfide da affrontare, come il miglioramento dell'efficienza, la riduzione dei costi di produzione e la competitività rispetto ad altre fonti di energia, promette di ricoprire un ruolo fondamentale per la transizione verso un futuro energetico sostenibile. È necessario, inoltre, investire in ricerca e sviluppo per identificare materiali più economici: la riduzione dei costi è cruciale per rendere tali dispositivi competitivi sul mercato e favorirne la diffusione.

La ricerca condotta dalla Pennsylvania State University ha permesso di sviluppare dei materiali in grado di incrementare l'efficienza di conversione dei dispositivi TEG fino al 15%.

“Ciò che abbiamo dimostrato generando un'efficienza di conversione del 15%, ha affermato il professore Bed Poudel, è che ora questa tecnologia è molto competitiva con altre tecnologie di generazione energetica su scala ridotta, come piccoli generatori diesel o persino pannelli solari”.

Il futuro di questa tecnologia è ormai prossimo.

