



63° Congresso Nazionale ATI

23-26 settembre 2008

ENERGIA PER LO SVILUPPO SOSTENIBILE



DF DARIO
FLACCOVIO
EDITORE

CONFRONTO TECNICO ECONOMICO TRA SOLUZIONI PER LA CONVERSIONE DIRETTA DELL'ENERGIA TERMICA IN ENERGIA ELETTRICA

F. Rossi¹, A. Nicolini¹, M. Filipponi¹, M. Amantini¹

¹CIRIAF, Università degli Studi di Perugia, Dipartimento di Ingegneria Industriale, Sezione di Fisica Tecnica,
Via G. Duranti 67, 06125, Perugia

SOMMARIO

Nel presente lavoro viene valutato lo stato dell'arte tecnologico di alcuni sistemi per la conversione diretta dell'energia termica in energia elettrica quali i Convertitori Termoelettrici a Metallo Alcalino (AMTEC: Alkali Metal Thermal Electric Converter), i Convertitori Termoelettrici ad Effetto Seebeck (TEG: Thermo-Electric Generator) ed i motori Stirling.

Il fine del lavoro è quello di fornire gli strumenti per la scelta della migliore soluzione tecnologica per lo sfruttamento dei cascami di calore derivanti dagli impianti tradizionali di produzione di energia e per incrementare l'efficienza dei sistemi che impiegano fonti rinnovabili quali le biomasse o l'energia solare.

Le prestazioni delle singole tecnologie vengono confrontate sulla base delle loro caratteristiche tecniche, energetiche ed economiche mettendo in evidenza i punti di successo della tecnologia e le problematiche ancora irrisolte che ne limitano la diffusione.

INTRODUZIONE

Il risparmio energetico non può prescindere da un più efficiente sfruttamento delle fonti energetiche tradizionali e di quelle rinnovabili.

In questa ottica un'innovativa opportunità è offerta dai sistemi a conversione diretta del calore in energia elettrica.

I punti di forza di queste tecnologie sono la loro indipendenza dal sistema di produzione del calore e dalla differenza di temperatura tra sorgente calda e sorgente fredda oltre che l'ampia disponibilità di cascami di calore nei tradizionali impianti di produzione di energia.

Nel presente lavoro viene valutato lo stato dell'arte tecnologico dei sistemi per la conversione diretta dell'energia termica quali i Convertitori Termoelettrici a Metallo Alcalino (AMTEC: Metalli Alkali Metal Thermal Electric Converter), i Convertitori Termoelettrici ad Effetto Seebeck (TEG: Thermo-Electric Generator) ed i motori Stirling.

Per ciascuna dei dispositivi oggetto di studio è descritto il principio di funzionamento e sono indicate le caratteristiche tecniche evidenziando le prestazioni in termini energetici, exergetici e di potenza elettrica sviluppata per unità di peso.

A partire dall'analisi e dal confronto dei dati raccolti sono quindi individuati i punti di successo delle tecnologie e le problematiche ancora irrisolte che ne limitano la diffusione.

CONVERTITORI TERMOELETTRICI A METALLO ALCALINO (AMTEC)

Principio di funzionamento

Il termoconvertitore AMTEC è un dispositivo elettrochimico capace di convertire staticamente (ovvero senza movimento di parti meccaniche) ed in modo diretto il calore in energia elettrica.

Questi sistemi impiegano un metallo alcalino (litio, sodio o potassio) per il processo di conversione. Tutti i cicli AMTEC si basano sulla β -allumina come elettrolita solido (BASE) per trasportare le cariche elettriche.

I due lati dell'elettrolita sono connessi a due elettrodi che a loro volta sono collegati elettricamente con un carico esterno (vedi Fig. 1). Gli atomi dei metalli alcalini ionizzano all'interfaccia tra l'elettrodo e l'elettrolita mentre gli ioni metallici passano attraverso l'elettrolita, gli elettroni liberi migrano dall'anodo verso il catodo attraverso il carico esterno e producono lavoro. Una volta al catodo gli elettroni si ricombinano con gli ioni del metallo alcalino formando nuovamente atomi neutri che vengono ricondotti all'anodo mediante un sistema di ricircolo. Come conseguenza della elevata pressione presente sul lato anodico i vapori alcalini tendono ad espandersi, tuttavia l'elettrolita solido è impermeabile sia agli atomi neutri che agli elettroni.

Per il vapore di metallo l'unico modo per espandersi è quindi quello di ionizzare i suoi atomi neutri, producendo cationi alcalini ed elettroni liberi.

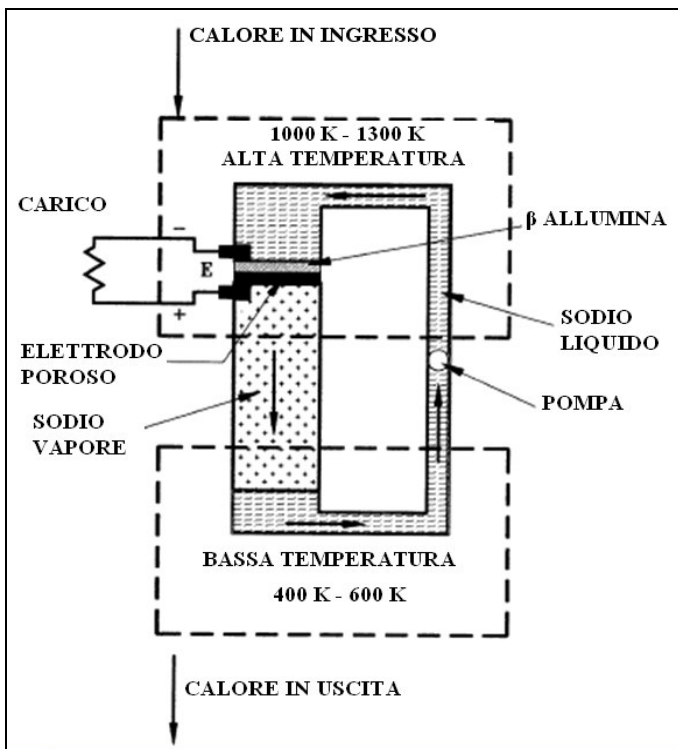


Figura 1. Schema di funzionamento di un termoconvertitore AMTEC [1].

A questo punto l'elettrolita BASE permette ai cationi alcalini di passare attraverso la membrana e la differenza di pressione esistente sostiene il loro movimento: gli ioni alcalini positivi si accumulano sul lato a bassa pressione, mentre gli elettroni restano sul lato ad alta pressione generando all'equilibrio una differenza di potenziale che impedisce l'ulteriore flusso di ioni metallici (vedi Fig. 2).

Connettendo gli elettrodi ad un carico esterno è possibile sfruttare il potenziale elettrico che si è generato: gli elettroni liberi prodotti all'anodo fluiscono attraverso il carico esterno producendo lavoro utile e ritornano al catodo dove si ricombinano con gli ioni positivi del metallo alcalino che hanno attraversato l'elettrolita.

Gli atomi neutri del metallo alcalino, ricombinati nel reparto catodico, si trovano in stato gassoso a bassa pressione e sono mandati ad un condensatore dove passano allo stato liquido. Dopo la condensazione il flusso alcalino liquido viene riciclato nella regione anodica ad alta pressione dove è riconvertito in vapore in pressione nell'evaporatore. In tal modo si ha un riciccolo continuo del metallo alcalino.

Ci sono due tipi principali di cicli AMTEC chiamati ciclo anodo liquido e ciclo anodo-vapore. I due cicli si differenziano per la diversa fase del metallo alcalino a contatto con l'anodo che nel primo caso è liquido e nel secondo vapore.

Caratteristiche tecniche ed energetiche

I convertitori AMTEC, a seconda del metallo alcalino utilizzato, operano con una sorgente calda a temperatura compresa tra 900 K e 1300 K e con una sorgente fredda ad una

temperatura compresa tra 400 K e 700 K [3], [4], [5].

Uno dei principali vantaggi della tecnologia AMTEC è l'elevata efficienza di conversione elettrica che può raggiungere teoricamente il 40%, quando il lato ad elevata temperatura opera intorno ai 1000 K e il lato a bassa temperatura intorno ai 500 K [5].

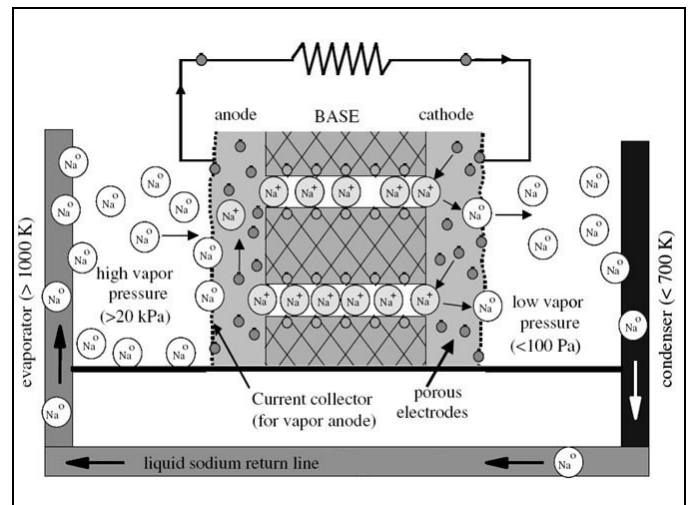


Figura 2. Flusso delle cariche e degli ioni in un AMTEC a ciclo anodo-vapore [2].

Tuttavia in laboratorio i rendimenti energetici massimi raggiunti sono ancora di circa il 19 % [3]. L'efficienza energetica della cella PX-3A, funzionante presso i laboratori AFRL (Air Force Research Lab) fonte della quasi totalità delle recenti pubblicazioni scientifiche sull'argomento ha un valore di circa il 13% [4], [6],[7].

La causa dello scostamento tra le prestazioni teoriche e da laboratorio dei sistemi AMTEC sono da ricondurre principalmente alle perdite di calore per conduzione ed irraggiamento attraverso l'involucro della cella stessa [1], [6].

Per una macchina di conversione termica che opera tra due diverse temperature il rendimento exergetico ed il rendimento energetico sono collegati mediante l'espressione riportata nell'Eq. 1.

I rendimenti di conversione exergetica teorico e sperimentale dei dispositivi AMTEC, sulla base dei rendimenti energetici suddetti e considerando una temperatura ambiente pari a 290 K, sono rispettivamente del 54% e del 25%.

$$\eta_{ex} = \frac{W_{el}}{Q_{input} \cdot \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{max}}\right)} = \frac{\eta_{en}}{\left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{max}}\right)} \quad (1)$$

I termo convertitori AMTEC presentano inoltre il vantaggio di non avere parti in movimento, di avere una buona potenza elettrica specifica per unità di peso pari a 16 W/kg (considerando un rendimento energetico del 19%), di non avere flussi di materia al di fuori dell'involucro della cella stessa. Inoltre i sistemi AMTEC, impiegando come sorgente energetica calore a temperatura inferiore rispetto ai sistemi di conversione energetica tradizionali possono essere abbinati a cascami termici di altri processi quali celle a combustibile,

reattori nucleari, ecc..

Nonostante i vantaggi precedentemente elencati, la tecnologia AMTEC presenta anche alcune problematiche. Il più importante è quello relativo alla diminuzione nel tempo delle prestazioni. Questo fenomeno, imputabile alla degradazione dell'elettrolita BASE, preclude l'impiego di tali dispositivi in tutte quelle applicazioni che richiedono lunghi periodi di funzionamento senza la possibilità di effettuare alcuna operazione di manutenzione.

La cella PX-3A, ad esempio mostrare una diminuzione della potenza elettrica prodotta dopo un periodo di funzionamento di 170. Dopo un periodo di funzionamento di 18.000 la potenza elettrica diminuisce del 49 % passando da un valore iniziale di 2,48 W ad un valore di 1,27 W [4], [5]. A queste problematiche si aggiungono quelle legate alla sicurezza. I convertitori AMTEC impiegano infatti soluzioni con metalli alcalini quali ossido di alluminio, ossido di sodio che oltre certe concentrazioni sono potenzialmente pericolose.

La diminuzione delle prestazioni del sistema e le problematiche di sicurezza impongono frequenti manutenzioni dello stesso. Attualmente i costi di produzione dei dispositivi AMTEC sono stimabili in 10.000 €/kW.

Nella tabella che segue sono riportate sinteticamente le caratteristiche tecniche dei dispositivi AMTEC.

Tabella 1. Caratteristiche tecniche e rendimenti di conversione energetica dei dispositivi AMTEC.

Rendimento energetico [%]		Rendimento exergetico [%]		Rapporto potenza/peso [W/Kg]	Temperatura massima di alimentazione [K]	Temperatura sorgente fredda [K]	Durata [ore]
teorico	reale	teorico	reale				
40	19	54	25	16	1.000-1.300	400-700	170
<i>Vantaggi</i>				<i>Svantaggi</i>			
Non ha parti meccaniche in movimento				Impiego di soluzioni alcaline potenzialmente pericolose			
Piccole dimensioni dei dispositivi				Diminuzione della potenza elettrica dopo meno di 200 ore di funzionamento			
Bassa temperatura della sorgente calda che permette l'abbinamento a cascami termici di altri processi (celle a combustibile, reattori nucleari, ecc..)				Manutenzioni frequenti			
				Costo elevati stimabile in 10.000 €/kW			

CONVERTITORI TERMOELETTRICI AD EFFETTO SEEBECK (TEG)

Principio di funzionamento

Un termoconvertitore TEG è un sistema statico in grado di trasformare, mediante effetto Seebeck, energia termica in energia elettrica.

L'effetto Seebeck è un effetto termoelettrico per cui in un circuito costituito da due diversi conduttori metallici una differenza di temperatura tra le giunzioni genera differenza di potenziale e il passaggio di corrente fra le giunzioni stesse (vedi Fig. 3). Solo negli anni 50-60 a seguito della scoperta dei semiconduttori (materiali le cui proprietà stanno a metà tra quelle tipiche dei metalli e quelle degli isolatori) si è potuto aumentare in modo consistente l'efficienza dei dispositivi termoelettrici ad effetto Seebeck.

In un generatore termoelettrico sono presenti: una fonte di calore, un modulo TEG, un dissipatore di calore, ed un carico applicato.

Il sistema può anche includere un circuito per la regolazione della tensione, o una ventola per la dissipazione del calore. In Fig. 4 è riportato lo schema di un convertitore termoelettrico ad effetto Seebeck.

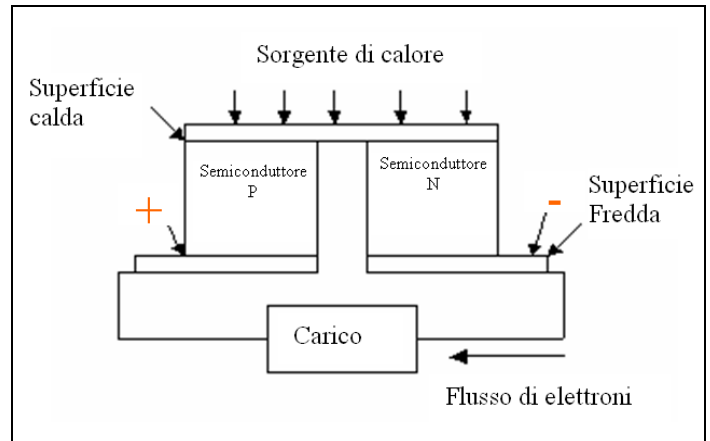


Figura 3. Schema di funzionamento di un termo convertitore ad effetto Seebeck.

Il modulo termoelettrico TEG, posizionato nella parte centrale del termoconvertitore, è costituito da un array di pellets semiconduttori drogati con portatori di cariche sia positive che negative. Le coppie di pellets n/p sono configurate in modo da essere elettricamente connessi in serie, ma termicamente in parallelo.

Un substrato di ceramica metallizzata avvolge i pellets e i circuiti che li collegano in modo da formare un unico strato. Questo tipo di strato chiamato Functionally Graded Material (FGM) assicura un maggior flusso di calore ed un rilassamento da stress termico su celle TE particolarmente fragili.

Sono stati sviluppati diversi metodi di assemblaggio dei moduli termoelettrici quali: a pressione meccanica, bonding a istenti a pressione e deboli a sollecitazioni a taglio.

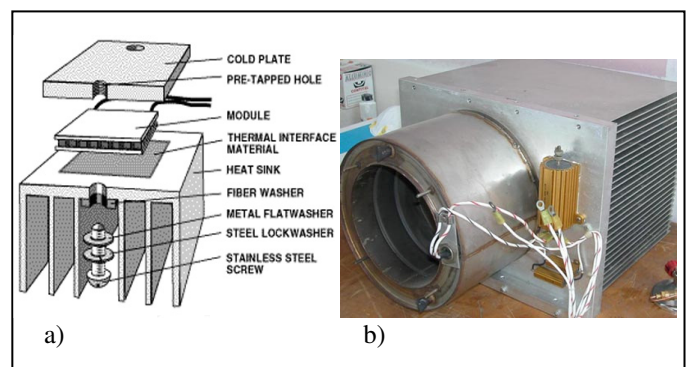


Figura 4. Generatore termoelettrico ad effetto Seebeck. a) schema di assemblaggio [8], b) immagine di un dispositivo commerciale.

Caratteristiche tecniche ed energetiche

Le prestazioni dei moduli termoelettrici dipendono dalla natura delle coppie di semiconduttori che generano l'effetto Seebeck e dalla temperatura operativa delle due superfici del modulo TEG.

A parità di efficienza di conversione, la temperatura della sorgente calda varia in funzione della tipologia di semiconduttori che costituiscono la coppia n/p. Ad esempio nel caso di P-BiTe la temperatura ottimale della sorgente calda è di 400 K, per una coppia costituita da 2P-PbTe è di 650 K e per una coppia di semiconduttori costituita da P-TAGS-8 di 750 K [2]. Le prestazioni del dispositivo dipendono inoltre dalla differenza di temperatura che si ha all'interno del modulo termoelettrico. In genere questa deve essere tra 200 e 300 K [2].

L'efficienza di conversione energetica teorica raggiungibile dai TEG è dell'ordine del 10% grazie all'impiego di semiconduttori drogati p ed n. Attualmente i moduli HZ-20 della Hi-Z Technology Inc. costituiti da semiconduttori drogati con bismuto e tellurio sono quelli più diffusi dal punto di vista commerciale. Tali moduli hanno dei rendimenti di circa il 5%, operando con superficie calda a temperatura di 520 K e superficie fredda a 300 K [8], [9].

Considerando un'efficienza di conversione energetica del 10%, una temperatura della sorgente calda di 550 K ed una temperatura ambiente di 290 K si ottiene mediante l'Eq.1 un rendimento di conversione energetica teorico del 21%. Tale valore si abbassa sensibilmente nel caso si prendano a riferimento le prestazioni del modulo commerciale HZ-20 a circa l'11%.

Il vantaggio principale della tecnologia in esame è quello della elevata potenza prodotta per unità di peso che per l'HZ-20 è di 160 W/Kg ma che può teoricamente arrivare fino a oltre 300W/Kg [8]. I convertitori TEG inoltre possono funzionare mantenendo inalterate le caratteristiche di tensione corrente. I modelli commercializzati dalla Hi-Z Technology Inc. sono garantiti per una durata di funzionamento maggiore di 10 anni [8].

La tecnologia TEG impiega materiali ampiamente e facilmente disponibili sul mercato per la maggior parte dei suoi componenti. Questa caratteristica in aggiunta all'estrema semplicità costruttiva che consente di contenere le dimensioni geometriche di tali dispositivi permette di avere dei bassi costi di produzione del convertitore stesso. Prendendo a riferimento modulo commerciale HZ-20 il prezzo commerciale è di 4.400 €/kW [8].

Ai vantaggi sopra elencati si aggiungono quello di non avere parti in movimento e di non avere flussi di materia al di fuori dell'involucro della cella stessa.

I convertitori termoelettrici Seebeck inoltre operano con temperature massime della sorgente calda basse quindi permettono la valorizzazione energetica di cascami termici molto degradati dal punto di vista energetico come quelli dei fumi di scarico delle autovetture e dei camion [9] oltre che l'impiego del calore prodotto dall'energia solare [10].

Il limite maggiore alla diffusione di questi sistemi è comunque il rendimento di conversione energetica che in pratica è dell'ordine del 5% e giustifica l'impiego dei TEG solo là dove vi siano delle esigenze specifiche come nelle missioni spaziali.

Nella tabella che segue sono riportate sinteticamente le caratteristiche tecniche dei dispositivi TEG.

Tabella 2. Caratteristiche tecniche e rendimenti di conversione energetica dei dispositivi TEG.

Rendimento energetico [%]		Rendimento exergetico [%]		Rapporto potenza/peso [W/Kg]	Temperatura massima di alimentazione [K]	Temperatura sorgente fredda [K]	Durata [ore]
teorico	reale	teorico	reale				
10	5	21	11	160	300-800	200-500	90.000
<i>Vantaggi</i>						<i>Svantaggi</i>	
Non ha parti meccaniche in movimento						Basse efficienze che per essere per incrementare le quali occorrono leghe metalliche rare e costose	
Bassi costi di manutenzione							
Bassa temperatura della sorgente calda che permette di impiegare differenti fonti energetiche anche rinnovabili quali biomasse ed energia solare o gas di scarico di camion e autovetture							
Costi bassi di produzione stimabili in 4000 €/kW dovuti alla facilità costruttiva e alla elevata disponibilità sul mercato dei materiali che costituiscono il dispositivo							
Piccole dimensioni dei dispositivi							

MOTORI STIRLING

Principio di funzionamento

Lo Stirling è un motore a combustione esterna a ciclo chiuso che solitamente utilizza come fluido evolvente aria, azoto oppure nelle versioni ad alto rendimento elio o idrogeno. Il ciclo termodinamico ideale di riferimento è il ciclo Stirling (vedi Fig. 5) composto da due isoterme (BC, DA) e due isometriche (AB, CD).

Se il riscaldamento a pressione costante AB è attuato integralmente per mezzo del calore sottratto lungo il raffreddamento a volume costante CD, essendo AB e CD due linee di egual trasmissione, il sistema scambia calore con l'esterno soltanto alle temperature estreme T1 e T2 ed il ciclo di Stirling ha lo stesso rendimento del ciclo di Carnot fra T1 e T2.

Il funzionamento del sistema Stirling prevede il movimento dei pistoni in seguito all'espansione e alla compressione del gas che scorre alternativamente da un ambiente regolato da un termostato caldo ad uno con termostato freddo dopo essere passato attraverso un rigeneratore di calore.

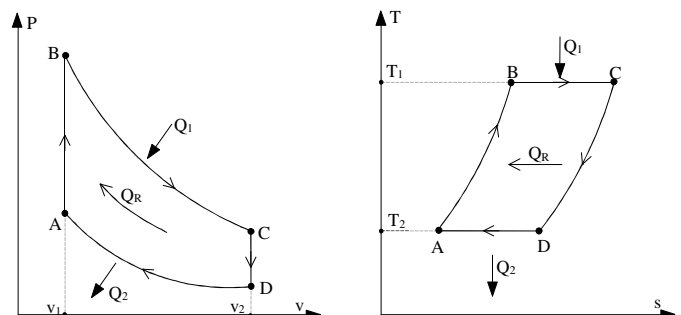


Figura 5. Ciclo di Stirling sui piani P-v e T-s. AB, CD= linee di egual trasmissione ed isometriche; BC, DA= isoterme; Q1= calore ricevuto; Q2= calore restituito; QR= calore recuperato [11].

Lo scambiatore caldo rappresenta la sorgente ad alta temperatura del ciclo che essendo esterna è svincolata dalla macchina e può quindi essere di qualsiasi tipo. Il rigeneratore assorbe e restituisce alternativamente calore al fluido di lavoro.

Lo scambiatore freddo, che costituisce la sorgente a bassa temperatura, è generalmente uno scambiatore a fascio tubiero a flusso incrociato che sfrutta acqua come fluido refrigerante. Nella Fig. 6 si riporta uno schema impiantistico degli elementi termodinamici sopra elencati, basilari per la realizzazione del ciclo.

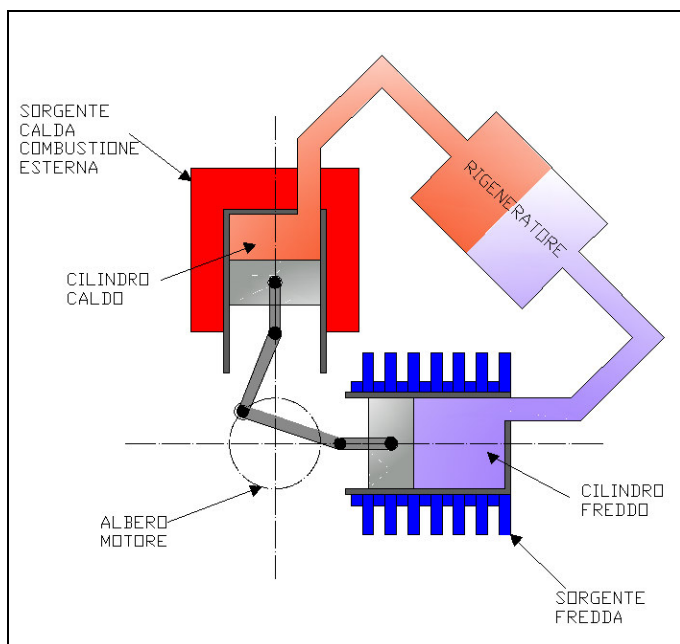


Figura 6. Schema impiantistico degli elementi termodinamici che costituiscono il motore Stirling.

Il moto del fluido evolvente è regolato non dalla presenza di valvole, bensì dalle variazioni di prodotte dal moto degli stantuffi.

In funzione delle posizioni assunte dagli stantuffi si individuano quattro fasi:

1. Il fluido caldo viene trasferito attraverso il rigeneratore dal cilindro verticale (ambiente ad alta temperatura) al cilindro orizzontale (ambiente a bassa temperatura).
2. Il gas freddo viene compresso, con un lavoro L_c .
3. Il movimento fa espandere il gas nel cilindro verticale. Per effetto del riscaldamento sia del rigeneratore che della superficie con temperatura regolata dalla sorgente calda, il fluido subisce un'espansione con conseguente produzione di lavoro L_e .
4. Il collegamento del pistone verticale all'albero motore induce un movimento di espansione del cilindro orizzontale che richiama il gas caldo e riparte il ciclo dalla fase 1.

La somma del lavoro ottenuto durante la fase di espansione del gas caldo e di espansione successiva, è maggiore del lavoro di compressione e delle perdite di energia dovute all'attrito.

Esistono molte configurazioni cinematiche che permettono meccanicamente di realizzare un ciclo termodinamico Stirling.

Nella Fig. 7a e nella Fig. 7b sono riportati gli schemi cinematici e termodinamici delle configurazioni Alfa, Beta, Gamma che sono quelle più diffuse.

Oltre alla classificazione di cui sopra, effettuata in base ai possibili accoppiamenti dei cilindri, esistono classificazioni in base alle tipologie di funzionamento (singola fase, multi fase, risonante, ecc..) e in base alla tipologia di accoppiamento dei pistoni (accoppiamento rigido, accoppiamento con liquido, accoppiamento con gas).

L'interesse per questo motore è ripreso improvvisamente a partire dagli anni 70 [12] in seguito al grande processo di miglioramento delle proprietà fisiche, termiche e meccaniche dei materiali costituenti il motore [13], alla possibilità di effettuare il processo di rigenerazione con alti valori di efficacia, e infine all'impiego dell'idrogeno come fluido motore nel ciclo.

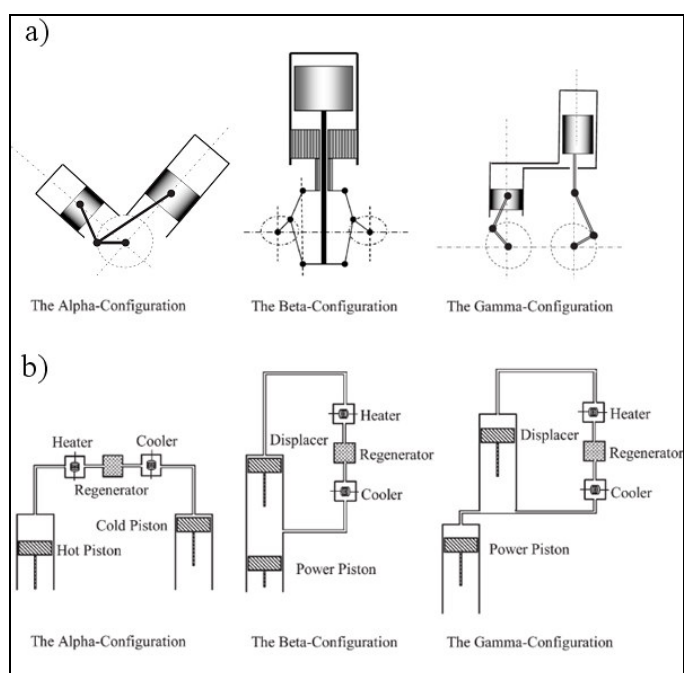


Figura 7. Schematizzazione delle configurazioni più diffuse di motore Stirling. a) schema cinematico [14]; b) schema degli elementi termodinamici [15].

Caratteristiche tecniche ed energetiche

Le caratteristiche tecniche e le prestazioni energetiche degli Stirling sono strettamente correlate alla configurazione termodinamica del motore, alla sua taglia oltre che all'applicazione finale per cui il motore stesso è stato realizzato. Il ciclo di Stirling ha lo stesso rendimento teorico massimo di un ciclo di Carnot che, come è noto, offre le migliori prestazioni energetiche ed exergetiche fra due temperature prefissate.

I rendimenti di conversione termica dei motori Stirling più recenti sono dell'ordine del 33 % [12], [16], [17].

I rendimenti di conversione elettrica corrispondenti, ottenuti considerando dei rendimenti meccanici di 0,82 e dei rendimenti all'alternatore pari a 0,92, sono quindi di circa il 25% anche se alcuni prototipi hanno raggiunto rendimenti di conversione elettrica del 32% [18].

Considerando che il rapporto tra la temperatura massima del ciclo e quella minima è di circa 2 [12] [16] e raggiunge 2,5 per i prototipi innovativi [18] il rendimento di conversione termica in base alla Eq. 2 (espressione del rendimento della macchina di Carnot) ha un valore teorico pari al 57%. Considerando dei rendimenti meccanici di 0,82 e dei rendimenti all'alternatore pari a 0,92 si ottiene un rendimento teorico massimo di conversione elettrica è pari al 43 %.

$$\eta_{en} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}} \quad (2)$$

Le odierne tecnologie, in particolar modo quelle relative al rigeneratore, che è l'organo preposto alla realizzazione delle linee di ugual trasmissione, garantiscono rendimenti termodinamici delle macchine Stirling dell'ordine del 60 % ÷ 70 % di quelli della macchina di Carnot che opera tra le stesse temperature [12], [14].

I motori Stirling sono quindi caratterizzati da elevate efficienze di conversione dell'energia termica ed elettrica.

Un altro importante vantaggio offerto dai motori Stirling è la possibilità di funzionamento con un vasto range di temperatura della sorgente calda. Per i motori Stirling detti High-Temperature la sorgente calda ha un valore compreso tra 800 K e 1000 K [16], [17], per i motori Medium-Temperature ha un valore compreso tra 200 K e 500 K [19], mentre per i motori Low-Temperature tale temperatura è di circa 100 K [15].

L'efficienza di conversione energetica delle varie tipologie di Stirling decresce con la temperatura della sorgente calda. In questo studio sono stati presi a riferimento gli Stirling High-Temperature; le altre tipologie, sebbene caratterizzate da rendimenti di conversione più bassi, risultano tuttavia ugualmente interessanti per la possibilità di operare con sorgenti di calore a bassa temperatura quali l'energia solare [15], [18] o le biomasse [20], [21].

I rendimenti exergetici teorici e quelli realmente raggiunti nella conversione elettrica dai motori Stirling, individuati per mezzo della Eq. 1 sono rispettivamente dell'ordine dell' 60% e del 35%.

L'assenza delle valvole e del 50% delle parti in movimento rispetto ad un motore a combustione interna tradizionale, garantisce al motore Stirling una vita utile compresa tra le 40.000 e le 60.000 ore di funzionamento. La combustione esterna riduce notevolmente anche il numero degli interventi di manutenzione e dei cambi d'olio.

La potenza specifica per unità di peso è molto elevata e si può arrivare anche a 170 W/Kg [12], [22], [23].

Il costo dei motori Stirling non è elevato e varia da 1500 €/kW per impianti di grossa taglia (50÷200 kW) fino ad arrivare a 3500 €/kW per impianti di piccola potenze.

Lo svantaggio principale del convertitore Stirling è il tempo di avviamento elevato dovuto alla notevole inerzia termica del sistema stesso.

Nella tabella che segue sono riportate sinteticamente le caratteristiche tecniche dei dispositivi Stirling.

Tabella 3. Caratteristiche tecniche e rendimenti di conversione energetica dei dispositivi Stirling.

Rendimento energetico [%]		Rendimento exergetico [%]		Rapporto potenza/ peso [W/Kg]	Temperatura massima di alimentazione [K]	Temperatura sorgente fredda [K]	Durata [ore]
teorico	reale	teorico	reale				
43	25	60	35	170	1000	300	60.000
<i>Vantaggi</i>				<i>Svantaggi</i>			
Basso costo che è dell'ordine di 1500 €/kW per impianti di grossa taglia e può arrivare anche a 3500 € per impianti di piccola taglia					Presenza di elementi meccanici quali gli alternatori per la conversione dell'energia meccanica in energia elettrica che aumentano la complessità impiantistica e le operazioni di manutenzione del sistema		
Non fa uso di sostanze pericolose o infiammabili							
Costi di manutenzione non elevati							
Vasto range di temperatura della sorgente calda che permette di impiegare differenti fonti energetiche anche rinnovabili quali biomasse ed energia solare					Tempo di avviamento elevato dovuto alla grande inerzia termica		

CONFRONTO

Tutte le tecnologie studiate sfruttano sorgenti calde con temperature inferiori a 1300 K e quindi possono essere impiegate per lo sfruttamento e la valorizzazione energetica dei cascami di calore derivanti dai tradizionali sistemi di produzione energetica o in abbinamento a fonti di calore rinnovabili quali le biomasse o il sole.

In particolar modo i convertitori termoelettrici possono essere impiegata dove il calore è disponibile ad una temperatura inferiore a 800 K.

Dal confronto delle caratteristiche dei diversi sistemi analizzati emerge che le tecnologie più economiche per la conversione del calore in energia elettrica sono quella Stirling e TEG. Entrambe le tecnologie hanno vite medie confrontabili superiori a 60.000 ore e si dimostrano sufficientemente affidabili avendo tra l'altro dei contenuti costi di manutenzione. I convertitori termoelettrici ai vantaggi della semplicità costruttiva e dell'assenza di parti in movimento contrappongono bassi rendimenti energetici (5%) ed exergetici (11%). I motori Stirling con rendimenti energetici del 25% ed exergetici del 35% costituiscono la tecnologia più efficiente tra quelle esaminate. Un inconveniente dei motori Stirling è l'elevata inerzia termica del sistema che rende necessari tempi di avviamento molto elevati. I motori Stirling inoltre non convertono direttamente il calore in energia elettrica ma necessitano di elementi meccanici quali gli alternatori che complicano costruttivamente la macchina e ne aumentano i costi di manutenzione.

Dal confronto fra i rendimenti exergetici raggiunti e teorici massimi raggiungibili dalle tecnologie in esame si può ricavare il grado di maturità della tecnologia che risulta essere ridotta per i sistemi AMTEC in cui i rendimenti sono minori di quelli teoricamente ottenibili. I convertitori AMTEC sono infatti quelli più lontani dalla commercializzazione su larga scala lasciando spazio a modelli commerciali di solo tipo prototipale. Da quest'ultima considerazione deriva anche il costo elevato del sistema che è circa doppio a parità di potenza dei sistemi TEG e Stirling.

A gravare negativamente sui convertitori AMTEC c'è anche la bassa potenza per unità di peso (16 W/Kg) che è 10 volte inferiore rispetto alle altri sistemi analizzati. I TEG e gli

AMTEC hanno potenze specifiche superiori a 150 W/Kg.

La diffusione degli AMTEC è fortemente limitata anche dalla sensibile diminuzione delle prestazioni del sistema dopo solo 200 ore di funzionamento e dalle problematiche di sicurezza che impongono frequenti manutenzioni del dispositivo.

Nella tabella che segue sono riportate sinteticamente le caratteristiche tecniche e le prestazioni in termini di conversione energetica dei dispositivi esaminati.

Tabella 4. Confronto fra le caratteristiche tecniche e i rendimenti di conversione energetica dei dispositivi AMTEC, TEG e Stirling.

		AMTEC	TEG	STIRLING
Rendimento Energetico [%]	Real	40	10	43
	Teor	19	5	25
Rendimento Exergetico [%]	Real	54	21	60
	Teor	25	11	35
Rapporto Potenza/Peso [W/Kg]		16	160	17
Temperatura massima di alimentazione [K]		1.000-1.300	300-800	1.000
Temperatura sorgente fredda [K]		400-700	200-500	300
Durata [ore]		170	90.000	60.000
Costo €/kW		10.000	4.000	1.500-3.500
Parti meccaniche in movimento		NO	NO	SI
Uso sostanze potenzialmente pericolose		SI	NO	NO
Costi di manutenzione		ELEVATI	MOLTO BASSI	BASSI

CONCLUSIONI

Nel presente lavoro sono state individuate le caratteristiche di alcune tecnologie di conversione energetica ed in particolare dei sistemi AMTEC, TEG, Stirling al fine di operare un confronto fra i suddetti sistemi sia da un punto di vista tecnico che economico.

Dall'analisi delle prestazioni energetiche ed exergetiche e delle caratteristiche tecniche emerge che le tecnologie più mature e con minori costi di realizzazione per kW installato sono i sistemi Stirling e TEG.

Fra questi quelli più semplici in termini impiantistici e che presentano minori operazioni e costi di manutenzione sono i sistemi TEG. Di contro, pur tenendo conto dello sviluppo futuro dei materiali e del perfezionamento delle tecnologie, i convertitori termoelettrici hanno rendimenti energetici ed exergetici teorici molto bassi.

I motori Stirling, nonostante la maggiore complessità costruttiva, rappresentano i sistemi con il valore più elevato dell'efficienza di conversione energetica.

I convertitori AMTEC costituiscono la tecnologia con le prospettive di sviluppo più interessanti; allo stato attuale non sembrano tuttavia ancora in grado di competere con i motori Stirling e con i convertitori termoelettrici.

NOMENCLATURA

η_{ex}	Rendimento exergetico	[%]
η_{en}	Rendimento energetico	[%]
W_{el}	Potenza elettrica prodotta	[W]
Q_{input}	Calore fornito dalla sorgente calda	[K]
T_{amb}	Temperatura ambiente	[K]
T_{max}	Temperatura della sorgente calda	[K]
T_{min}	Temperatura della sorgente fredda	[K]

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Thermacore Inc. Lancaster Pennsylvania, High efficiency Vapour-Fed AMTEC System For Direct Conversion. Final report, Prepared for U.S Department of Energy Washington, D.C. 20585, Contract Number DE- FG05-91ER81233, June 1, 1992.

2. Mohamed S. El. Genk, Jean-Michel P. Tournier, AMTEC/TE Static Converters For High Energy Utilization, Small Nuclear Power Plants, *Energy Conversion and Management*, vol. 45, pp.512-535, 2004.

3. M. A. Ryan, The Alkali Metal Thermal-To-Electric Converter For Solar System Exploration, Proc. 18th International Conference on Thermoelectrics, 0-7803-5451 - 6/00/\$10.00 02000 IEEE, pp. 630-638, 1999.

4. M.A.K. Lodhi, Justin B. Briggs, Temperature Effect On Lifetimes Of AMTEC Electrodes, *Journal of Power Sources*, vol. 168, pp.537-545, 2007.

5. M.A.K. Lodhi, P. Vijayaraghavan, A. Daloglu, An Overview Of Advanced Space/Terrestrial Power Generation Device: AMTEC, *Journal of Power Sources*, vol. 168, pp. 25-33, 2001.

6. M.A.K. Lodhi, A. Daloglu, Performance Parameters Of Material Studies For AMTEC Cell, *Journal of Power Sources*, vol. 85, pp. 203-211, 2000.

7. M.A.K. Lodhi, V. R. Malka, Optimization Of The TIEC/AMTEC cascade cell for high efficiency, *Journal of Power Sources*, vol. 156, pp. 685-691, 2005.

8. Hi-Z Technology, HZ-20 DataSheet, www.hi-z.com.

9. Madhav A Karri, Eric F Thacher, Brian T Helenbrook, Marc S Compeau, Thermoelectrical Energy Recovery From The Exhaust Of A Light Truck, Proc. Diesel Engine Emissions Reduction Conference, 2003.

10. H. Scherrera, L. Vikhorb, B. Lenoira, A. Dauschera, P. Poinas, Solar Thermoelectric Generator Based On Skutterudites, *Journal of Power Sources*, vol. 115, pp. 141-148, 2003.

11. M. Felli, Lezioni di Fisica Tecnica 1-Nuova edizione a cura di F. Asdrubali, Morlacchi Editore, 2004.

12. Jack G. Slaby, Overview of NASA Lewis Research Center Free-Piston Stirling Engine Activities, Rept. DOE/NASA/1005-2 NASA TM-83649, Nineteenth Intersociety Energy Conversion Engineering Conference cosponsored by the ANS, ASME, SAE, IEEE, AIAA, ACS, and AIChE, San Francisco, California, August 19-24, 1984.

13. G.Lundholm, The Experimental V4X Stirling Engine – A Pioneering Development, Proc. 11th International Stirling Engine Conference, 2003.

14. D.G. Thombarea, S.K. Vermab, Technological Development In The Stirling Cycle Engines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, pp 1-38, 2008.

15. Banha Kongtragool, Somchai Wongwises, A Review Of Solar-Powered Stirling Engines And Low Temperature Differential Stirling Engines, *Renewable and Sustainable*

Energy Reviews; vol. 7, pp 131-154, 2003.

16. Takeshi Hoshino, Hitoshi Naito, Tsutomu Fujihara And Kunihisa Eguchi, Experimental Study On Stirling Engine Generator And Solar Receiver System For Future Space Applications, *Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit*, (IECEC) 35th Intersociety, vol.1, pp 266-271, 2000.

17. Youssef Timoumi, Iskander Tlili, Sassi Ben Nasrallah, Performance optimization of Stirling engines, *Renewable Energy*, vol. 33, pp.2134–2144, 2008.

18. SunPower, High Performance Free-Piston Stirling Engines, www.sunpower.com.

19. S. Iwamoto, F. Toda, K. Hirata, M. Takeuchi, T. Yamamoto, Comparison Of Low- And High Temperature Differential Stirling Engines, Proc. 8th International Stirling Engine Conference, 1997.

20. Carlsen Henrik, Development Of A Wood Powder Fuelled 35 Kw Stirling Chp Unit, Proc. 11th International Stirling Engine Conference, 2003.

21. Erich Podesser, Electricity production in rural villages with a biomass Stirling Engine, *Renewable Energy*, vol. 16, pp 1049-1052, 1999.

22. G.R. Dochat, M. Dhar, Free Piston Space Stirling Technology Program, *Energy Conversion Engineering Conference*, 1989. *IECEC-90. Proceedings of the 24th*

Intersociety, vol 2. pp. 849-854, 1989.

23. Peter A. Chapman, Nicholas A. Vitale, and Thomas J. Walter, 5-kWe Free-Piston Stirling Engine Converter, Rept. IAC-07-C3.2.07, NASA Glenn Research Center, 2007.

SUMMARY

This paper relates about the technology state of the art achieved by direct energy conversion systems from thermal to electric as AMTEC (Alkali Metal Thermal Electric Converter), TEG (Thermo-Electric Generator) and Stirling Engine.

The aim of the work is give instruments to choose the best technological solution to exploit heat waste arisen from energy production plants and to increase the efficiency of energy production system from renewable as biomass and sun.

Performance of analyzed technologies are compared in terms of technical, energetic and economic characteristic.

Successful features and unsolved problems that limit scale up and spreading are carried out.