

## La rigenerazione

I motori ad aria calda, a bassi rendimenti, furono costruiti prima dell'invenzione di Stirling, e quindi a rigore non possono essere definiti "motori Stirling"; il criterio innovatore di invenzione di Stirling del 1816, che ha reso possibile un utilizzo ragionevole del motore ad aria calda, è il rigeneratore.

Nel flusso alternato tra punto caldo e punto freddo è interposto un accumulatore di calore, così da limitare la cortocircuitazione diretta di calore nel punto freddo, dove il calore è sottratto dalla refrigerazione. L'accumulatore di calore è il rigeneratore e ad ogni ciclo sottrae e rende calore al fluido di lavoro rispettivamente nelle fasi di compressione ed espansione.

Il rigeneratore è costituito da una piccola massa di materiale, buona conduttrice di calore e buona capacità termica, con un'elevata superficie di scambio, così che possa, al flusso del gas caldo verso il refrigeratore, catturare parte significativa del calore, ed in virtù della piccola massa aumentare rapidamente di temperatura. Quando il gas refrigerato di ritorno riattraversa il rigeneratore, questo cede il calore accumulato al gas, ed abbassa in ugual modo la sua temperatura; il gas ritorna così al punto caldo già preriscaldato: il motore, riducendo il calore sottratto dalla refrigerazione, ha un rendimento drasticamente superiore.

In motori di maggiore tecnologia i rigeneratori sono costituiti da lamine sottili, lane metalliche o "garze" metalliche impilate costituite da fili molto sottili, i materiali usati sono di norma metalli (oltre che con alta densità e conducenti termicamente) inossidabili e resistenti al calore: acciaio inossidabile, nickel o sue leghe.



## il motore Stirling

Cenni storici e principi di funzionamento **P.1**

Approfondimenti tecnici **P.2**

I motori ITS-Energy **P.3**

Possibili applicazioni **P.4**

## Cenni storici

L'invenzione del motore Stirling, detto anche motore ad aria calda di Stirling, è una evoluzione dei motori ad aria calda preesistenti, che all'inizio del 1800 competevano con il motore a vapore per fornire energia meccanica ai macchinari industriali (in opifici e miniere) della prima rivoluzione industriale in Inghilterra. In particolare l'invenzione di Stirling riguardò l'adozione di un recuperatore di calore che effettivamente risultò essere il dispositivo adatto per migliorare in modo notevole il rendimento del motore.

Altre applicazioni del motore Stirling si ebbero con lo sviluppo dell'elettronica, l'uso dei primi apparecchi radio e lo sviluppo dell'aviazione, prima del 1960. La Philips (industria olandese di produzione di apparecchi radio) per alimentare gli apparecchi radio-trasmittenti e riceventi di sua costruzione realizzò una piccola unità Stirling di generazione elettrica mediante combustione di petrolio, utile per alimentare appunto tali apparecchi in postazioni remote e prive di alimentazione elettrica. L'apparecchio realizzato fu il Philips MP1002CA (detto Bungalow Set) con una potenza di circa 200 watt; la tecnologia usata fu quella allora all'avanguardia con uso anche di leghe leggere (1950), ottenendo un buon compromesso tra praticità e costo. L'esigenza di tale generazione elettrica era particolarmente sentita per alimentare gli apparecchi radio (allora dotati di grosse ed onerose valvole termoioniche), necessari per il collegamento stabile con i campi di aviazione della rete aerea civile in costituzione (in prima fase per il servizio postale) in luoghi remoti e senza attrezzature.

Altre applicazioni sono state realizzate in seguito, e sviluppate attualmente con motori di diversa taglia, nel campo della generazione elettrica, autotrazione e nautica ottenendo discreti o buoni successi tecnici, ed in qualche caso anche commerciali per mercati di nicchia.

## Principio di funzionamento

Il motore funziona a ciclo chiuso utilizzando un gas come fluido termodinamico (solitamente aria, azoto oppure elio o idrogeno nelle versioni ad alto rendimento). Quando è raggiunta un'opportuna differenza di temperatura tra il suo punto caldo ed il punto freddo, viene provocata una pulsazione ciclica (opportunamente avviata all'inizio), normalmente trasformata in moto alternato dei pistoni. La pulsazione perdura fino a quando si continua a mantenere la differenza di temperatura, somministrando calore al punto caldo e sottraendone al freddo.

Una particolarità di questo motore è quella di funzionare senza fare ricorso a valvole. Le sole parti in movimento sono il pistone ed il dislocatore che agiscono collegati ad un albero motore con una coppia di gomiti sfasati tra loro di circa 90 gradi.

È probabilmente uno dei più interessanti motori a combustione esterna per la sua bassa manutenzione, la sua silenziosità e la possibilità, ad oggi non realizzata, di raggiungere rendimenti prossimi a quello massimo teorico per cicli termodinamici: quello del ciclo di Carnot. Un grosso pregio inoltre viene dal fatto che la combustione non è vincolata a combustibili specifici.

È possibile anche utilizzare il calore della radiazione solare concentrata, ad esempio tramite uno specchio parabolico, per produrre la differenza di temperatura necessaria.

La scoperta di nuovi materiali tecnologici costruttivi in grado di aumentare la differenza di temperatura necessaria al funzionamento, nuovi fluidi termodinamici e le problematiche ambientali degli ultimi anni hanno dato nuovi impulsi alla realizzazione di motori Stirling di largo impiego. Le realizzazioni più significative che iniziano ad avere qualche successo commerciale sono quelle per la generazione elettrica- termica domestica, unendo semplicità e bassa necessità di manutenzione.

## Confronto con i motori a combustione interna

### VANTAGGI

Il motore Stirling è a combustione esterna, questo significa che le parti maggiormente riscaldate dal calore (che può essere prodotto da combustione) non sono a contatto con le parti scorrenti o rotanti, (cuscinetti, pistoni), di conseguenza tali parti ed il lubrificante non sono particolarmente sollecitati, le parti hanno quindi esigenze di manutenzione ridotte.

Il motore non ha valvole e non subisce scoppi, quindi è costruttivamente più semplice, quasi privo di vibrazioni e molto meno rumoroso di un motore a combustione interna.

La somministrazione del calore per il funzionamento è continua, quindi in caso che il calore sia prodotto mediante combustione questa avviene in maniera continua, facilmente controllabile con rapporto stechiometrico aria-combustibile che può essere ottimale, in assoluto la migliore possibile.

La somministrazione di calore può avvenire con qualsiasi mezzo: calore solare concentrato, ma anche mediante la combustione di legna, carbone, gas, biogas, combustibili liquidi. Al di fuori di possibilità particolari, le tecnologie che appaiono meglio gestibili sono il calore solare ed i combustibili liquidi e gassosi.

### SVANTAGGI

Il calore non è prodotto all'interno del motore ma è applicato dall'esterno, quindi occorre trasferirlo all'interno; ugualmente, dato che il motore utilizza il dislivello di calore, occorre sottrarre calore per creare un punto freddo. In sintesi: il fluido agente è all'interno del motore, il suo riscaldamento o il suo raffreddamento rendono necessaria la presenza di estese superfici (fasci tubieri o radiatori) per riscaldarlo raffreddarlo.

L'energia (e la potenza) erogata è proporzionale al dislivello di temperatura tra sorgente calda e punto freddo, con il limite di temperatura per il freddo dato dalla temperatura ambiente. Aumentare quindi il dislivello significa innalzare la temperatura del punto caldo, con limite dovuto essenzialmente ai limiti tecnici ed al costo dei materiali capaci di resistere a temperature elevate.

Una maniera per aumentare la potenza erogata è quella di aumentare la pressione del fluido interno, aumentando così la mole del fluido di lavoro. L'uso di apparecchiature chiuse, in pressione (pressurizzate), rende però necessario un attento dimensionamento strutturale e tecnologico del motore che deve essere stagno, robusto e più pesante.

# Tre diverse configurazioni di funzionamento

## Configurazione Alfa

Il motore Stirling in configurazione Alfa risulta forse più comprensibile nel suo funzionamento, che si può considerare basato su 4 fasi:

1. spinta
2. riscaldamento
3. espansione
4. raffreddamento

Nel dettaglio:

il pistone in basso spinge l'aria verso il pistone in alto, che quindi si sposta, lasciando entrare l'aria; l'aria si scalda, si espande, e quindi "torna" indietro verso il pistone in basso, che quindi si sposta;

lo spostamento del pistone in basso fa arrivare l'aria calda a contatto col dissipatore di calore, che quindi si raffredda, e di conseguenza si contrae, facendo spostare verso destra il pistone in alto;

lo spostamento verso destra del pistone in alto, aiutato dall'inerzia accumulata dal volano, fa sì che il perno, continuando a girare, faccia abbassare il pistone inferiore, spingendo di nuovo l'aria verso il pistone in alto, e il ciclo ricomincia.

## Configurazione Beta

Consideriamo un sistema cilindro più pistone. La testata del cilindro è collegata ad una camera dotata di una parete calda mentre il corpo del cilindro ad una parete fredda.

All'interno della camera è collocato il dislocatore, che è costituito da un materiale isolante, non a tenuta, in grado di coprire alternativamente la parete calda e la parete fredda.

Il ciclo del motore è il seguente:

il dislocatore copre la parete fredda della camera.

Il gas della camera, essendo riscaldato, si espande.

Il pistone si muove verso l'esterno della camera (verso l'alto): nel suo moto spinge la giunzione che ruota e che a sua volta sposta il dislocatore sulla parete calda, isolando dal calore la camera che inizia a raffreddarsi.

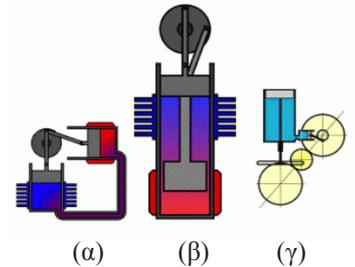
Il gas si contrae richiamando il pistone.

Il pistone si muove verso l'interno (verso il basso): analogamente a prima, nel suo moto, sposta il dislocatore sulla parete fredda

## Configurazione Gamma

La configurazione gamma è analoga alla Beta, ma non ha i pistoni coassiali, che invece possono essere a corsa parallela affiancata ovvero perpendicolare, ma comunque cercando di minimizzare gli spazi volumetrici "morti" tra i due pistoni.

La configurazione Gamma (ad assi paralleli) semplifica la lubrificazione degli assi, e diminuisce le perdite per trafiletti ed attriti delle tenute, con un modesto incremento degli spazi volumetrici morti rispetto al Beta. Il leverismo rappresentato per il Gamma (a perno imboccolato su asola) non è necessariamente quello ottimale, esistendo comunque la possibilità di adottare sistemi biella-manovella, o di altro tipo.



In tutte le configurazioni descritte si utilizza sempre un volano posizionato sull'asse di rotazione, che accumula energia durante le fasi attive e la rilascia in quelle passive, cioè nelle quali il motore fa il lavoro passivo di trasferimento del fluido. Il volano rende possibile il moto rotatorio sostanzialmente uniforme.

## Impianti pressurizzati

La pressurizzazione aumenta semplicemente la massa del gas di lavoro, e quindi il possibile trasferimento di calore, a parità di cilindrata; l'aumento di pressione (con un adeguato aumento di energia termica) è approssimativamente proporzionale all'aumento di energia erogabile.

L'adozione di motori in pressione, presuppone una perdita dovuta alla compressione passiva di pompaggio del fluido presente nel carter, che obbligatoriamente, in tal caso, deve essere confinato; tale pompaggio, se pure limitato, è minimizzato ed addirittura trasformato in funzionale mediante la adozione di motori pluricilindrici con carter in comune.

L'uso dei vari gas come fluidi di lavoro è determinato da due criteri di notevole importanza.

- Dimensione delle molecole del gas

- Inerzia del gas

Il motore Stirling utilizza una oscillazione ciclica di un gas in ambiente confinato; in tali condizioni appare evidente la necessità di ridurre al massimo il volume del gas di lavoro, (riduzione degli spazi morti) per rendere più incisiva la azione dell'onda di pulsazione. D'altra parte nel volume dove avviene la pulsazione devono verificarsi importanti scambi di calore, con l'esterno e con le superfici di rigenerazione (ricupero del calore); in soluzioni non banali tali scambi sono resi possibili (senza aumentare i volumi), aumentando notevolmente le superfici di scambio, con l'adozione di finissime alettature, metalli porosi, radiatori a tubi sottili.

Pur essendo l'aria e l'azoto ambedue gas a peso molecolare elevato (e quindi ottimi vettori per il calore) la loro notevole dimensione molecolare eleva l'attrito per il flusso del gas in vani molto stretti, tale attrito, con vani di passaggio inferiori a misure dell'ordine del millimetro ad alta velocità, finisce col vanificare le possibilità di trasporto potenziale del calore di tali gas. Per contro l'elio ed ancor più l'idrogeno con dimensione molecolare molto piccola, fluiscono in fori o vani sottilissimi con attriti molto ridotti; il flusso in tali vani permette quindi di elevare moltissimo la superficie di scambio senza aumentare i volumi; lo scambio di calore, così grandemente elevato, può ampiamente compensare il modesto peso molecolare (e contenuto termico) di tali gas. L'adozione di gas diversi dall'aria rende peraltro obbligatorio il confinamento pressurizzato dei gas; il confinamento in pressione aumenta la densità del gas, e quindi anche la loro capacità termica. Per quanto concerne l'elio, la sua inerzia costituzionale lo rende sicuro nel caso di contatto con lubrificanti oleosi, anche l'idrogeno purché sia evitato il contatto con l'aria, essendo riducente, è relativamente inerte con lubrificanti oleosi. Anche l'azoto è inerte. L'aria è ossidante, e ad alta temperatura è comburente.



# I motori ITS Energy

**Il motore Stirling è di difficilissima progettazione teorica. La costruzione sperimentale di motori efficienti e performanti ha indirizzato i nostri ricercatori a procedere con materiali e tecnologie di alto profilo.**

Nelle prime fasi di sviluppo si è pensato di realizzare un motore in configurazione Alfa viste le similitudini con i consueti motori a combustione interna quindi maggiormente comprensibile nelle problematiche di funzionamento.

La prima versione era costituita da un bicilindrico in configurazione a "V" con angolo regolabile per poter massimizzare la prestazione della macchina a prescindere dall'efficienza degli scambi termici che si riuscivano a realizzare: in pratica questa prima macchina ha permesso di meglio comprendere il rapporto tra efficienza di scambio e realizzazione di un ciclo di lavoro ottimale.

I nostri attuali motori sono in gran parte evoluzioni di quella prima macchina.

L'ultima versione del motore è realizzata in gran parte con lega di alluminio, i metalli strategici sono usati solamente per gli scambiatori.

La geometria innovativa atta ad eliminare i volumi morti del fluido interno di lavoro ed a minimizzare le perdite per scorrimento interno dello stesso ha dimostrato subito di permettere di raggiungere prestazioni e rendimenti molto alti.

L'affinazione degli organi interni effettuata nei test di durata ed affidabilità hanno permesso di definire una macchina inedita ed estremamente efficiente.

**Geometria inedita, materiali di alto profilo per un motore di grande efficienza**

Le unità più recenti, denominate TS-V1 e TS-V2E, sono due motori per la generazione elettrica di taglie diverse ma realizzati con lo stesso concetto. Entrambi i motori hanno percorso una serie di test atti a definire le prestazioni e l'affidabilità. E' stato realizzato un banco di prova con l'acquisizione di tutte le grandezze di funzionamento monitorate in tempo reale e registrate per l'analisi a posteriori.

Ogni motore è stato strumentato con sensori di temperatura, pressione, accelerazione e velocità angolare per monitorare il fluido interno di lavoro. Un sensore di coppia istantanea è stato montato all'uscita dell'albero motore così da poter misurare e correlare istante per istante la prestazione effettiva del motore.

## I BREVETTI Un geometria innovativa

I brevetti depositati coprono a livello mondiale la geometria innovativa delle macchine realizzate e l'inedito sistema di modulazione della potenza istantanea che rende il motore adatto, non solo alla generazione elettrica stazionaria, ma anche all'autotrazione ed all'eventuale propulsione navale.



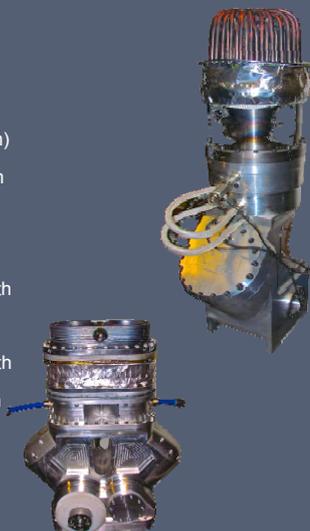
## SVILUPPI FUTURI Le prossime realizzazioni

Tra gli sviluppi futuri sono previste due nuove realizzazioni della macchina TS V2E : una per la generazione elettrica da concentrazione solare ed una per la propulsione con la possibilità di variare istantaneamente la coppia motrice. Per quest'ultimo impiego è inoltre previsto una realizzazione di un quattro cilindri ed un sei a partire dal modulo TS V2E.

## Generatori elettrici a ciclo Stirling ITS Energy

### TS-V1

Cilindrata:	322 cc
Peso:	16 Kg
Potenza:	1150w (@1500 rpm)
Coppia max:	6.5 Nxm
Rendimento max:	28%
Rendimento tot:	>90%
Calore prodotto:	2.9 KWth
Pressione interna:	8 bar
Calore assorbito:	4.5 KWth
Alimentazione a legna:	1.2 kg/h
Costo di un kwh elettrico da GPL:	67 €C
Costo di un kwh elettrico da metano:	25€C
Costo di un kwh elettrico da pellets:	16€C
Costo di un kwh elettrico da Legna:	8€C



### TS-V2 E

Cilindrata:	2474 cc
Peso:	95 Kg
Potenza:	7500w (@1500 rpm)
Coppia max:	42 Nxm
Rendimento max:	30%
Rendimento tot:	>90%
Calore prodotto:	22 KWth
Pressione interna:	6 bar
Calore assorbito:	35 KWth
Alimentazione a legna:	9 kg/h
Costo di un kwh elettrico da GPL:	65 €C
Costo di un kwh elettrico da metano:	24€C
Costo di un kwh elettrico da pellets:	15€C
Costo di un kwh elettrico da Legna:	7€C

## Motore Stirling con gassificatore

L'integrazione fra il motore Stirling e il processo della gassificazione permette l'utilizzo della biomassa come combustibile per la produzione di energia. L'utilizzo della biomassa permette di avere un ciclo di produzione ad impatto nullo sulle emissioni di CO<sub>2</sub>, (si rilascia in atmosfera il carbonio che biologicamente era stato inglobato, prelevandolo dalla atmosfera, nelle sostanze che vengono combuste); questo diviene molto interessante dato che non è introdotto nel sistema nuovo carbonio di origine fossile. Il motore Stirling può diventare così una tecnologia da valorizzare per facilitare il raggiungimento degli obiettivi fissati dal Protocollo di Kyoto. L'organizzazione di questo tipo di impianto prevede l'articolazione di cinque componenti principali:

- deposito della biomassa
- gassificatore
- caldaia
- motore Stirling
- accumulatore termico o volano termico

Tramite un sistema di coclee la biomassa (cippato legnoso) viene portata all'ingresso del gassificatore in cui la biomassa viene trasformata in syngas che, estratto dall'alto viene portato alla camera di combustione.

Nella camera di combustione si raggiungono temperature tra gli 800 e i 1250 °C e il motore Stirling è a diretto contatto con la fiamma stessa, andando a costituire un corpo unico fra caldaia e motore Stirling.

L'ultimo elemento è costituito dall'accumulatore termico che permette di utilizzare l'energia termica del ciclo di produzione per la produzione di acqua calda sanitaria e per il riscaldamento, ottimizzando così la resa energetica. La massima ottimizzazione si ottiene facendo funzionare l'impianto solo nei periodi in cui c'è la richiesta di energia termica. Per impianti di piccola taglia, si riesce ad avere una potenza elettrica di 35 kW e una potenza termica di 140 kW.

Nel 2008, in Provincia di Bologna si è realizzato il primo progetto italiano sperimentale di questo tipo, a servizio del complesso scolastico del comune di Castel d'Aiano, che utilizza il cippato come combustibile di partenza. Il percorso intrapreso prevede la realizzazione di altri impianti analoghi nello stesso comune.

L'impianto è stato realizzato grazie all'azione del centro CISA che, nato nel 2005 come consorzio fra Provincia di Bologna, Fondazione Cassa di Risparmio di Bologna e ISSI (Istituto Sviluppo Sostenibile Italia), si propone come promotore di iniziative legate alla diffusione delle energie rinnovabili e del risparmio energetico, con l'obiettivo finale di creare il Distretto delle Energie Sostenibili dell'Appennino bolognese.

## Possibili applicazioni del motore Stirling

I motori Stirling sinora visti sono poco adatti (a causa del suo ingombro, per la sua inerzia all'avvio ed alla variazione di regime) ad usi diversi dalla produzione continua di energia e calore.

Il motore Stirling nasce naturalmente efficace alla cogenerazione domestica o per piccole comunità in postazione fissa (è relativamente grosso e pesante) per potenze da 1 ai 100 kW elettrici, (tipicamente dal consumo domestico familiare a quello di un piccolo condominio), al di fuori di tali valori altri tipi di generazione sono maggiormente convenienti, ciclo Otto (motori a benzina), ciclo Rankine, e derivati (turbine a vapore), ciclo Brayton-Joule (turbina a gas), e ciclo Diesel (motore diesel)

Grazie all'adozione di materiali e tecniche costruttive sofisticate, e la miniaturizzazione delle parti con tecnologie consolidate, la turbina a gas è un micidiale concorrente soprattutto nelle fasce di potenza più alte.

La convenienza del motore Stirling è strettamente legato alla possibilità di usarlo come cogeneratore, ossia di poter utilizzare oltre l'energia elettrica il calore di raffreddamento della macchina (ad uso riscaldamento, in valore di circa il triplo o il quadruplo del valore della potenza elettrica), e trova congiuntura favorevole nella possibilità di usare combustibili o sorgenti di calore a disposizione localmente ed altrimenti non utilizzati (legna, carbone, biogas, solare e non ultimi i cascami termici di scarto).

Macchine di media potenza sono state realizzate e tuttora utilizzate per mantenere su tempi lunghi il livello di accumulo della energia elettrica in sommergibili militari svedesi a propulsione convenzionale. La produzione di calore con combustione in ambiente controllato (usando in immersione come comburente scorte di ossigeno liquido) permette la continua erogazione di energia elettrica ad usi di propulsione e di altro tipo tali da permettere di prolungare la autonomia delle immersioni profonde da poche ore a diverse settimane. È evidente che il peso del motore in questo caso non è fattore negativo, la disponibilità dell'acqua quale refrigerante è ovvia.

## Tecnologie per il mondo sviluppato, per il terzo mondo, e per alte tecnologie

La sorgente di calore può essere di qualsiasi natura, il che rende il motore Stirling utilizzabile in un gran numero di contesti.

Mentre appaiono evidenti i vantaggi di utilizzare, nei paesi maggiormente sviluppati, combustibili ottenuti da gassificatori, (tecnologia attualmente matura) e biogas, con filiere di materiali ampiamente disponibili (e ad oggi spesso non utilizzati); per il terzo mondo appare di enorme importanza avere comunque anche solo una modesta forza motrice, (per trebbiare, per pompare acqua, ecc.), quando i prodotti che alimentano il motore possono essere la combustione della stessa pula di riso o di altri cereali trebbiati, sterco di bovini seccato, paglia, torba, sterpi, segatuta di legno o cippato. Tali combustibili presenti in loco svincolano completamente la tecnologia dai combustibili fossili convenzionali.

Sono numerosissimi i dispositivi di riscaldamento domestico ed industriale di piccola, media o grande taglia che producono calore come prodotto di scarto, tipicamente sotto forma di gas combusti con temperature dai 100 ai 500 °C. L'energia sotto forma di calore contenuta in tali gas può essere almeno in parte recuperata da scambiatori e generatori Stirling. Con macchinari Stirling di maggior mole, ma tecnologicamente più economici, è possibile valutare la praticabilità del ricupero energetico anche di effluenti a temperature inferiori.

È stata proposta la applicazione di motori Stirling alla generazione elettrica ottenuta da calore di centrali nucleari. Il raffreddamento del nocciolo del reattore è previsto, in alcune "filieri" nucleari, che sia ottenuto con circolazione di sodio liquido, che ha un elevato contenuto calorico, ma è radioattivo per induzione, ed inoltre incendiario, esplosivo ed aggressivo in caso di accidentale contatto con aria atmosferica (umida) o con l'acqua. La pericolosità intrinseca ha portato all'abbandono di tale filiera, preferendo il raffreddamento del "core" radioattivo con acqua, gas, o acqua pesante. L'adozione di motore Stirling ad aria o a gas secchi in luogo di motori a vapore d'acqua (turbine a vapore), eviterebbe almeno il rischio dell'accidentale contatto tra sodio ed acqua negli scambiatori di calore: si evita così l'utilizzo di un fluido vettore calore per veicolare il calore all'esterno del nocciolo.

Utilizzi di altissima tecnologia del motore termoacustico Stirling sono stati realizzati dalla NASA allo scopo di fornire energia elettrica a satelliti nello spazio profondo in carenza di radiazione solare, in tal caso la sorgente di calore è l'emissione termica di radioisotopi, il punto freddo è semplicemente lo spazio.

Il vero grandissimo successo del ciclo Stirling (inverso) si ha con la macchina frigorifera di Stirling, che è l'unica macchina veramente adatta per la refrigerazione di fluidi nel campo di temperatura che va dai -30, -40 °C fino ai -200 °C (73 K) perché non funziona con il cambio di fase di fluidi.