

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale  
Corso di Laurea in Ingegneria dell'Energia

***Relazione per la prova finale  
«Analisi Termodinamiche del Ciclo  
Stirling»***

Tutor universitario:

Prof.ssa Campanale Manuela

Padova, anno accademico  
2023/2024

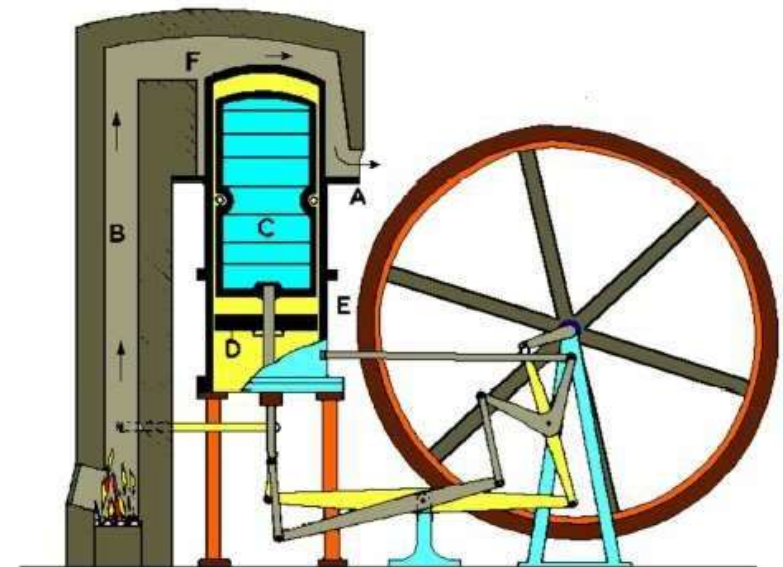
Laureando:

*De Nardo Giacomo 1139280*

Robert Stirling costruì la prima macchina termica detta “ad aria calda” nel 1816. Il ciclo termodinamico di questo motore si basa sulla proprietà dei gas per cui, a parità di pressione, se riscaldati si espandono, se raffreddati si contraggono. In questo motore il gas di lavoro è contenuto all’interno dei cilindri e non viene scaricato dopo ogni ciclo. Esso sfrutta un raffreddatore esterno e una fonte di calore anch’essa esterna. Per quest’ultima caratteristica il motore di Stirling è classificato come motore a combustione esterna. Esso ha quindi la possibilità di sfruttare qualsiasi fonte di energia. In figura è rappresentato l’inventore Robert Stirling.

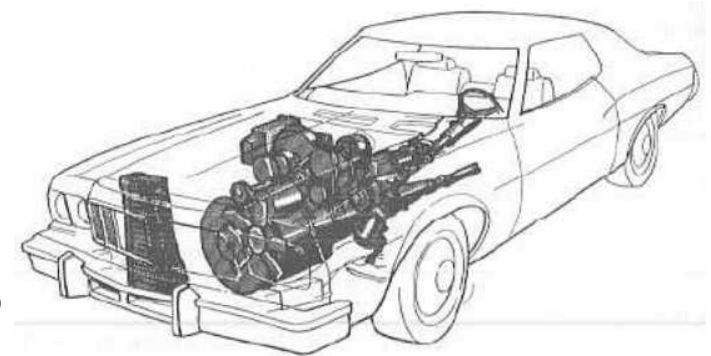


In figura è riportato lo schema relativo alla macchina proposta. In questa macchina lungo il cilindro A (in verticale) è riscaldato nella parte superiore dai gas combusti provenienti dalla fornace B. La parte inferiore è raffreddata con acqua o aria. Il cilindro contiene uno stantuffo dislocatore C ed uno stantuffo di potenza D. Al moto alterno del dislocatore corrisponde il flusso dell'aria, che attraversa alternativamente nei due sensi di marcia il rigeneratore termico, passando così dallo spazio freddo inferiore E (posto tra il fondo di C e la testa di D) e lo spazio caldo superiore F e viceversa. Il rigeneratore, non visibile in figura, è posto nello spazio anulare compreso tra il dislocatore e la parete interna del cilindro A. La sua funzione peculiare è quella di impedire lo scambio diretto di calore che si avrebbe tra il volume caldo e quello freddo che ci sarebbe a causa del travaso del fluido, e di rigenerare il calore disponibile per accrescere il rendimento termodinamico. Peculiarità importante della macchina di Stirling è che il fluido di lavoro rimane sempre racchiuso all'interno del cilindro: la macchina è quindi a ciclo chiuso.





In senso orario troviamo:  
Motore Philips MP1002CA,  
denominato Bungalow Set capace  
di produrre una potenza di 200W.  
Disegno di una Ford Torino Stirling  
special, ideata dalla ditta  
automobilistica statunitense Ford  
nel 1972 ma purtroppo non sbarcò  
mai sul mercato a causa  
dell'interruzione delle sovvenzioni  
per la ricerca sul motore.

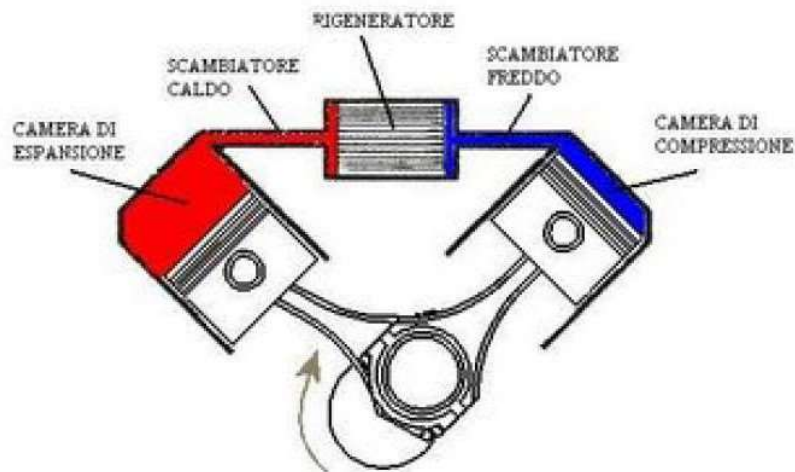


Un cosiddetto «Dish Stirling» che,  
accoppiato con un ricevitore solare  
a forma di disco riesce a  
concentrare il calore derivante  
dalla radiazione solare e utilizzato  
come fonte di calore ma anche per  
essere utilizzato in cascata per un  
sistema di cogenerazione.

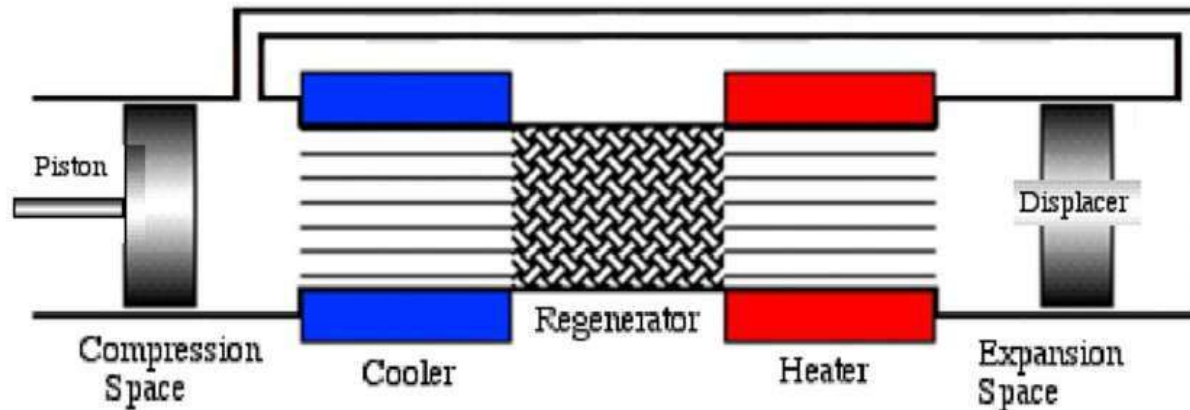
Un'applicazione per la produzione  
di energia elettrica.



Il motore Stirling si basa su un ciclo chiuso: una massa costante di gas è alternativamente riscaldata, espansa, raffreddata e compressa. Il motore è composto essenzialmente da due il pistone motore e pistone di spostamento, collocati nei rispettivi cilindri mantenuti a due diverse temperature. Il pistone motore è posto a contatto con uno scambiatore di calore ad alta temperatura, mentre quello di spostamento è a contatto con lo scambiatore a bassa temperatura. Tra i due pistoni si trova il rigeneratore.



Come fluido termodinamico di lavoro viene utilizzato un gas: aria, azoto, elio o idrogeno. Il gas di lavoro si muove tra i due scambiatori di calore: il primo, a contatto termico con la sorgente esterna di calore, riscalda il gas; il secondo, a contatto col fluido refrigerante, lo raffredda. In questo modo la temperatura e la pressione del gas nei cilindri cambiano continuamente. Il gas quindi segue il comportamento descritto dalla legge dei gas naturali che mette in relazione pressione, volume e temperatura: quando il gas viene scaldato si ha un aumento della pressione ed una conseguente espansione che muove un pistone producendo potenza meccanica. In un secondo momento quando raggiunge la parte meno calda del motore, il gas si raffredda, riducendo la pressione. Inizia qui la fase di compressione, durante la quale il pistone ritorna alla posizione di partenza compiendo meno lavoro.

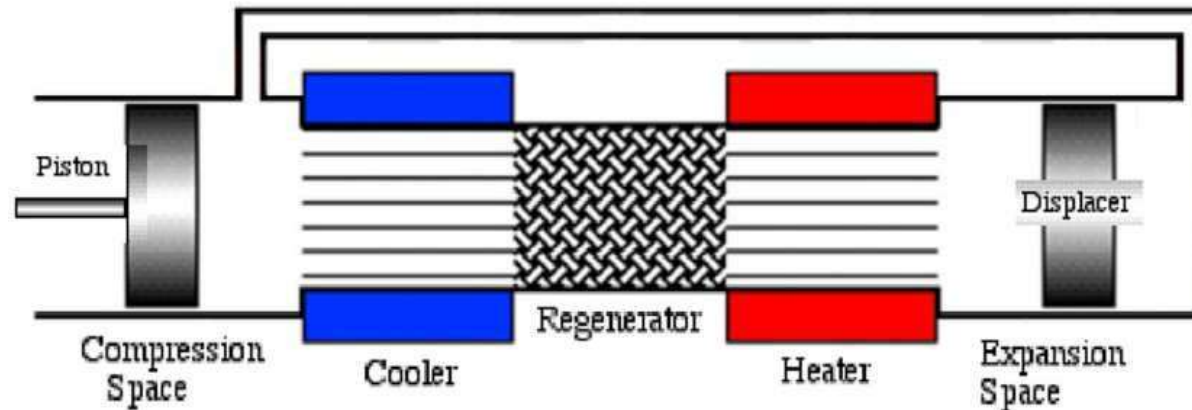


Volume di espansione (Expansion space)

Il volume di espansione equivale al volume entro cui il fluido di lavoro si espande a seguito dell'aumento della sua temperatura, diretta conseguenza dell'assorbimento del calore fornitogli dalla sorgente termica esterna.

Riscaldatore (Heater)

Con questo nome si identificano tutte quelle parti della macchina la cui funzione è quella di trasmettere il calore dall'esterno al fluido di lavoro contenuto nel volume d'espansione. Come già accennato in precedenza, uno dei vantaggi che un motore esotermico come lo Stirling può avere rispetto ad un motore endotermico, riguarda proprio la possibilità di poter essere alimentato con più tipologie di fonte energetica.

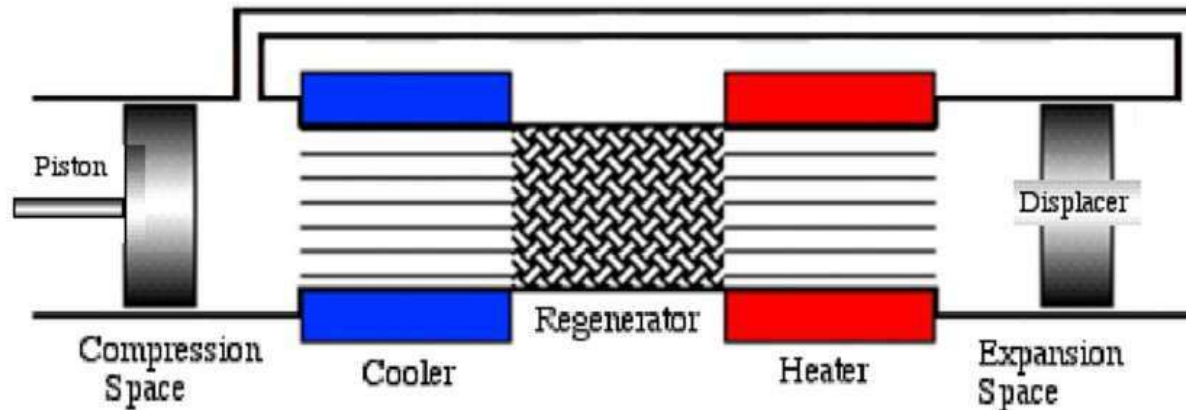


Volume di compressione (Compression space)

Esso è il volume entro cui il fluido di lavoro si contrae e subisce dunque una compressione a seguito della diminuzione della sua temperatura, causata dalla cessione della sua energia al pozzo termico.

Raffreddatore (Cooler)

La funzione è quella di estrarre il calore dal fluido di lavoro contenuto nel volume di compressione e trasmetterlo all'esterno.



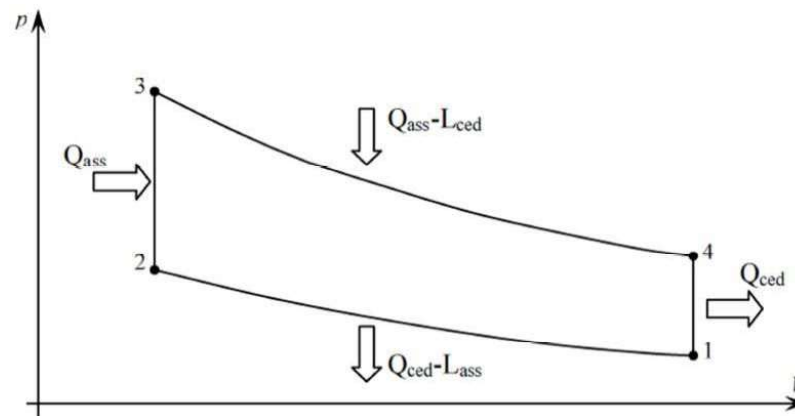
Pistone motore – pistone dislocatore (Piston - Displacer)

La sua funzione è quella di seguire le espansioni e le contrazioni del gas per trasformare in lavoro il calore che ciclicamente il gas assorbe e rilascia

Rigeneratore (Regenerator)

Questo componente è il cuore del motore Stirling. Ha il compito di assorbire il salto di temperatura tra la parte calda e quella fredda del motore: in base al senso di moto del fluido, cede calore al gas che circola verso lo scambiatore caldo e lo assorbe dal gas che circola verso il raffreddatore

La macchina di Stirling è una macchina a fluido che opera secondo un ciclo termodinamico rigenerativo chiuso. Esso prevede una compressione ed una espansione del fluido operante realizzate isotermicamente a due diversi livelli di temperatura ed intervallate da due trasformazioni isocore rigenerative.



Il ciclo Stirling ideale, come già detto, è formato da quattro trasformazioni:

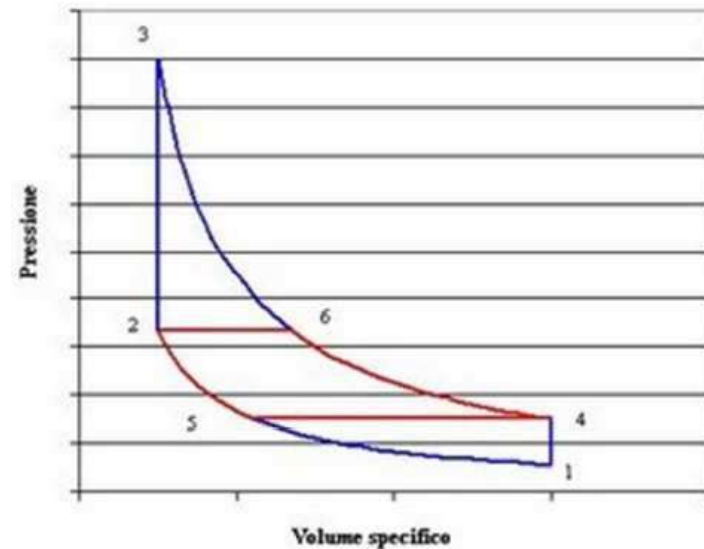
- compressione isoterma (1-2);
- compressione isocora rigenerativa (2-3);
- espansione isoterma (3-4);
- espansione isocora rigenerativa (4-1).

La prima fase del ciclo consiste nella compressione del fluido, rappresentata dalla trasformazione (1-2) che avviene nella camera di compressione. Tale trasformazione è isoterma e il gas rimane, quindi, rimane ancora alla temperatura minima  $T_{min}$ .

Il ciclo Stirling ora descritto risulta pertanto composto da due trasformazioni isoterme e da due trasformazioni isocore. Quindi, se si considera il teorema di Reitlinger, si può affermare che anche il sistema appena descritto realizza il massimo rendimento possibile, cioè il rendimento che avrebbe una macchina di Carnot che opererebbe nel medesimo intervallo di temperatura. Quanto appena affermato si può dimostrare nel seguente modo partendo dalla definizione del rendimento

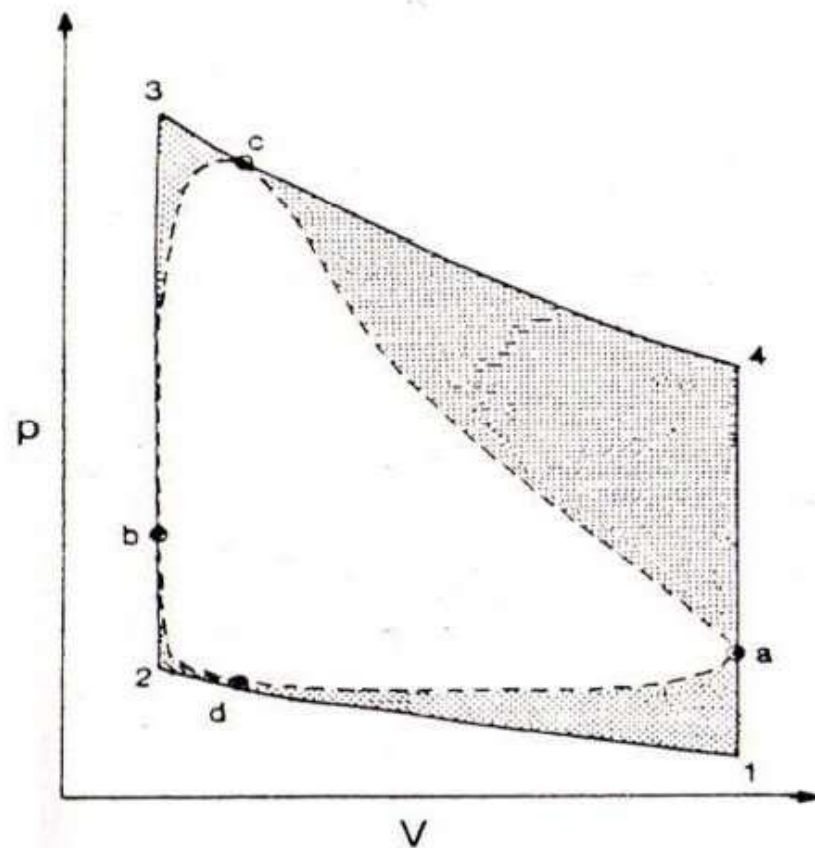
$$\eta = \frac{L}{Q_a} = \frac{Q_a - |Q_c|}{Q_a} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{max}} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}}$$

Se si va ad osservare l'efficienza dei cicli più comuni in sede ideale, ovvero Otto, Diesel, Rankine e Brayton-Joule, è possibile constatare che su nessuno di essi può essere applicato il concetto dimostrato da Reitlinger, pertanto nessuno di essi è in grado di raggiungere i livelli di efficienza del ciclo Stirling, che si rivela dunque essere il ciclo termodinamico ideale più efficiente. Di seguito la sovrapposizione del ciclo Ericsson e del ciclo Stirling due cicli sullo stesso piano pV, essendo il lavoro specifico equivalente all'area del ciclo: questo confronto è realizzato in figura, dal quale è possibile apprezzare come, a parità di salto termico e quindi di efficienza, il ciclo di Stirling ideale (linea blu) generi un'area più estesa dell'area generata dal ciclo di Ericsson ideale (linea rossa).

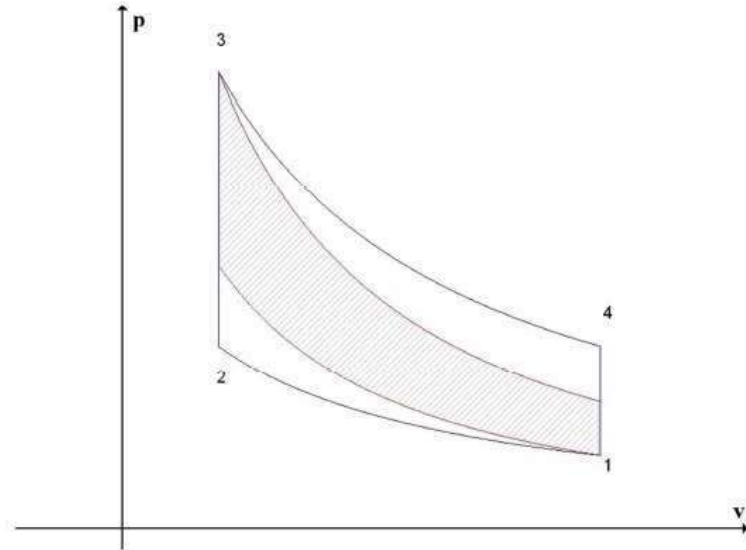


Allo scopo di giungere ad una prima, più realistica analisi della macchina di Stirling si passerà ora ad analizzare la serie di cause che rendono i cicli Stirling reali differenti da quelli ideali.

Perché il ciclo termicamente ideale di Stirling sia effettivamente compiuto, caratterizzato com'è da quattro vertici che comportano repentini cambiamenti termodinamici nel fluido e cinematici nel moto degli stantuffi, occorrerebbe che pistone e displacer fossero dotati di moto discontinuo e non di moto sinusoidale o quasi sinusoidale come spesso viene realizzato dai più comuni e semplici meccanismi adottabili nella pratica. In generale si può dire che, pur mantenendo i volumi massimo e minimo caratteristici della macchina ideale, nonché i punti in cui il gas è alla massima temperatura o a quella minima, è da attendersi una riduzione dell'area complessiva del diagramma così come qualitativamente riportato in figura:

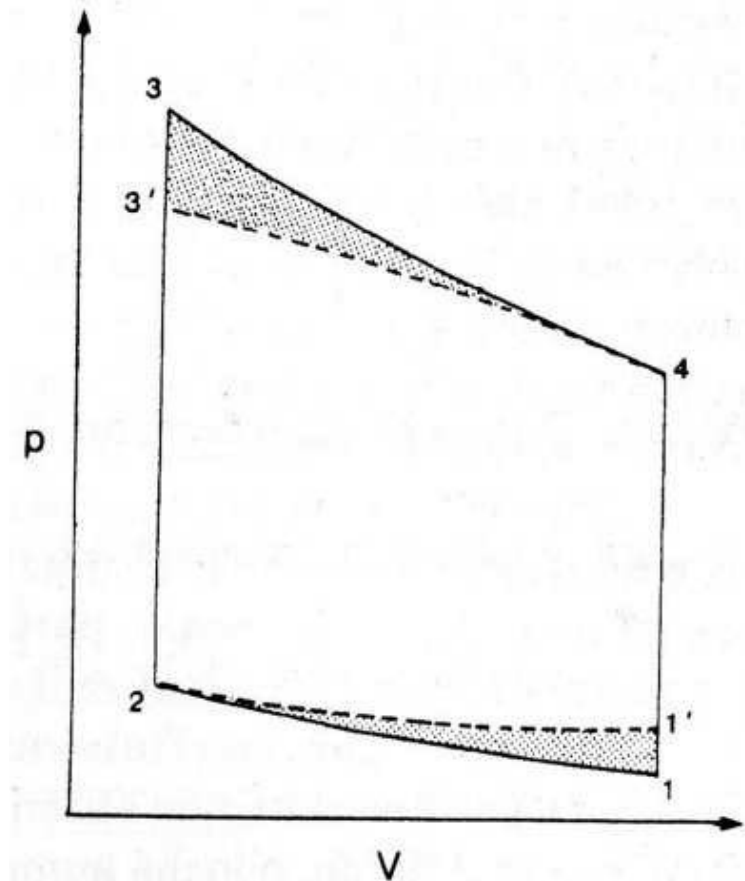


La velocità motore di rivoluzione di una macchina Stirling è solitamente abbastanza elevata (centinaia di cicli al minuto). Questo non permette al fluido di lavoro di scambiare calore con il riscaldatore e con il refrigeratore mantenendo costante la sua temperatura durante l'espansione e la compressione: pertanto, queste due trasformazioni non sono isoterme, ma somigliano molto più ad adiabatiche. Mantenendo invariati i valori massimi e minimi di pressione e volume specifico, la sostituzione delle due isoterme con due adiabatiche determina una diminuzione del lavoro specifico prodotto in un ciclo e l'aumento del calore assorbito, quindi una diminuzione del rendimento se la macchina funziona da un aumento invece del COP se la macchina funziona a ciclo inverso. In particolare, nel caso di funzionamento come motore, la diminuzione del rendimento rispetto a quello ideale di Carnot spesso supera il 50%.



Il ciclo ideale vorrebbe che tutto il calore trasmesso alla macchina dal riscaldatore. Nel ciclo reale invece, di tutto il calore introdotto dal riscaldatore solo una parte si muove secondo i percorsi prestabiliti, mentre la restante parte tende sempre a muoversi verso l'esterno seguendo i gradienti di temperatura presenti fra le varie parti della macchina: il fluido riscaldato avrà la tendenza a cedere una parte del suo calore per convezione alle pareti metalliche che lo circondano; per conduzione poi, il calore può essere trasmesso all'esterno, e da qui attraverso convezione ed irraggiamento essere disperso; in alternativa, il calore può essere trasmesso per conduzione nel dislocatore e da qui grazie alla convezione del fluido nel volume di compressione al refrigeratore o ad altri corpi metallici confinanti con l'esterno.

Condizione necessaria affinché la macchina di Stirling consegua un rendimento termodinamico pari a quello di una macchina di Carnot operante nelle stesse condizioni è che le due trasformazioni di rigenerazione siano complete, ovvero che tutto il calore rigenerabile sia effettivamente scambiato tra rigeneratore e fluido. Ciò nella pratica irrealizzabile in quanto occorrerebbe che, all'uscita dal rigeneratore, il fluido fosse in equilibrio termico con esso. Questo presupporrebbe un tempo di scambio termico illimitato o una lunghezza infinita del rigeneratore. Nel caso ideale, si vorrebbe che la capacità termica del fluido di lavoro fosse nulla, mentre quella del rigeneratore infinita: in tal modo, si avrebbero scambi termici istantanei, indipendentemente dalla loro entità. Non si avrebbero inoltre variazioni della distribuzione delle temperature nel rigeneratore. Nel caso reale invece, la capacità termica del rigeneratore è dipendente dalle sue dimensioni, dalle sue forme e dai materiali impiegati nella sua costruzione, mentre la capacità termica del gas dipende, oltre che dalla sua natura, dalla sua pressione e dalla velocità con la quale si muove. Quando il gas fluisce nel rigeneratore ad alta pressione (che significa alta densità) e/o ad alta velocità, la sua capacità termica è maggiore: questo può rendere insufficiente la capacità termica del rigeneratore, che quindi non riesce ad abbassare od aumentare considerevolmente la temperatura del gas che lo attraversa, provocando così un aumento delle perdite termiche verso l'esterno ed un aumento dell'assorbimento di calore in ingresso. Graficamente si può ricondurre l'effetto dell'inefficienza del rigeneratore a quanto riportato sul piano pV in figura.



L'analisi sul motore Stirling descritta in questo lavoro ha affrontato sia l'aspetto legato ai fenomeni termodinamici che avvengono all'interno di una macchina di questo tipo; sia l'aspetto meccanico caratterizzato dalla dinamica del sistema. Dinamica che è legata principalmente al particolare tipo di configurazione meccanica presa in considerazione (configurazione free-piston). Come descritto precedentemente il rendimento del motore Stirling è molto simile a quello di Carnot, ovvero il massimo rendimento estraibile da un motore endotermico, quindi, se la tecnologia potrebbe, un domani, avanzare nella ricerca con le nuove tecnologie delle quali si dispone al giorno d'oggi potremo vederlo un domani sulla nostra prossima automobile (speriamo) alimentata a combustibili fossili.

