

# Motore di Stirling

## Scopo dell'esperienza

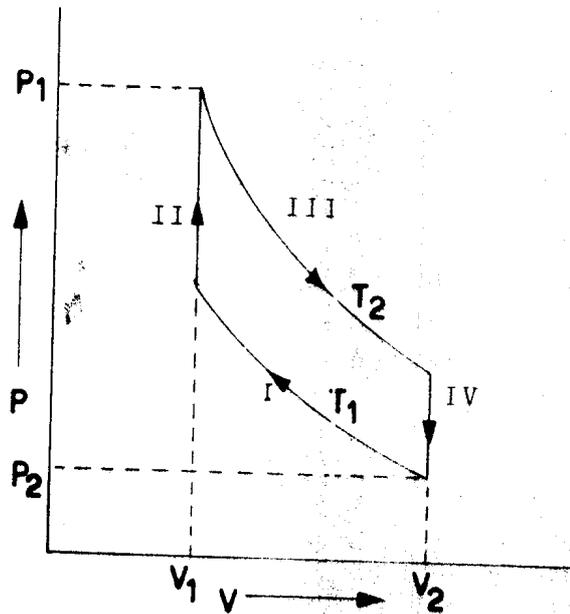
Lo scopo dell'esperienza è duplice:

- calcolare il rendimento del motore in seguito alla realizzazione di un ciclo termico
- determinare il potere refrigerante e calorifico nel caso in cui il motore compia un ciclo frigorifero.

## Descrizione del ciclo termico

Il ciclo è composto da quattro trasformazioni, rappresentate nel piano (p, V):

1. A → B: compressione isoterma a temperatura  $T_1$ , con diminuzione di volume ed aumento di pressione
2. B → C: trasformazione isocora con aumento di pressione e di temperatura, da  $T_1$  a  $T_2$ .
3. C → D: espansione isoterma a temperatura  $T_2$ , con aumento di volume e diminuzione di pressione
4. D → A: trasformazione isocora con diminuzione di pressione e di temperatura che ritorna al valore iniziale  $T_1$ .



Si definisce rendimento di una macchina il rapporto fra l'energia che ottengo durante un ciclo e l'energia che deve essere fornita durante il ciclo stesso:

$$\eta = \text{energia che ottengo} / \text{energia che fornisco}$$

Il lavoro ottenuto può essere calcolato utilizzando il primo principio della termodinamica, che uguaglia la variazione di energia interna durante una trasformazione termodinamica alla differenza

fra il calore assorbito ed il lavoro fatto dal sistema durante la trasformazione stessa. In un ciclo la variazione di energia interna è nulla e quindi il lavoro ottenuto coincide con la quantità di calore complessivamente scambiata fra sistema ed ambiente durante tutte le trasformazioni che costituiscono il ciclo. Graficamente il lavoro ottenuto è rappresentato dall'area contenuta nella curva che rappresenta il ciclo stesso nel piano pV.

Per determinare L e Q si considerano le singole trasformazioni:

$$L_{AB} = Q_{AB} = nRT_1 \ln(V_1/V_2)$$

$$L_{BC} = 0$$

$$Q_{BC} = nc_V(T_2 - T_1)$$

$$L_{CD} = Q_{CD} = nRT_2 \ln(V_2/V_1)$$

$$L_{DA} = 0$$

$$Q_{DA} = nc_V(T_1 - T_2)$$

per cui  $L = nR \ln(V_2/V_1) (T_2 - T_1)$

Il rendimento

$\eta = \text{energia (= lavoro) che ottengo} / \text{energia (= calore) che fornisco}$

può essere calcolato dalle relazioni precedenti. Si può notare come, nel caso in cui il calore scambiato durante le trasformazioni isocore non venga perso dal sistema, ma venga 'immagazzinato' in uno scambiatore, e successivamente da esso restituito, il rendimento del motore diventi dipendente solo dal rapporto fra le temperature delle due isoterme. Esso è quindi pari al rendimento del ciclo di Carnot.

In effetti la lana di rame che fa parte dell'apparato sperimentale ha proprio lo scopo di realizzare la presenza di uno scambiatore termico.

Essendo poi la potenza il rapporto fra il lavoro ottenuto e la quantità di tempo in cui esso è stato realizzato, si può facilmente passare dal lavoro alla potenza, ricavando così la potenza ottenuta durante il ciclo. Essa va confrontata con la potenza fornita per ottenere il rendimento come:

$\eta = \text{potenza che ottengo} / \text{potenza che fornisco}$

Nel caso in esame, la potenza fornita attraverso il passaggio di corrente in una resistenza, con cessione di calore all'aria, viene direttamente indicata dalla lettura del wattmetro. Durante l'esperienza vengono invece raccolti i dati che permettono di arrivare alla conoscenza della potenza ottenuta durante il ciclo.

La potenza ottenuta può anche essere ricavata con il metodo 'meccanico', detto del freno dinamometrico, per cui definiamo il rendimento del motore come:

$$\eta = P_M / P_E$$

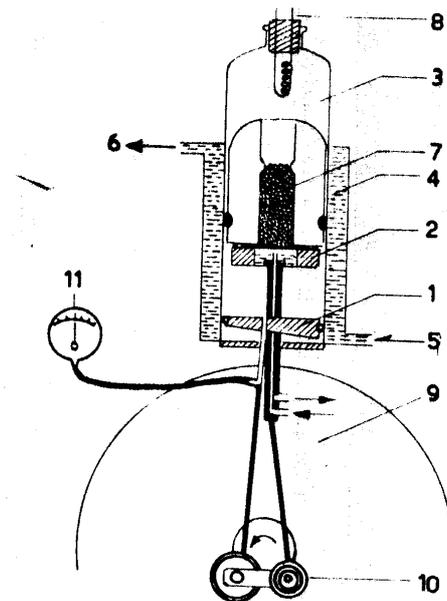
dove  $P_M$  è la potenza meccanica erogata dal motore e  $P_E$  la potenza elettrica responsabile del funzionamento del motore stesso.

Il motore ad aria calda è una macchina articolata in più elementi. Osserviamo che esso è costituito principalmente da un tubo di vetro lubrificato con olio al silicone e resistente al calore. In

esso distinguiamo due regioni: una parte inferiore e una superiore. La parte inferiore del cilindro è circondata da una camicia di raffreddamento; attraverso questa intercapedine scorre dell'acqua proveniente da due tubicini connessi da un estremo ai rubinetti presenti nel laboratorio, dall'altro agli opportuni attacchi collocati nel corpo centrale del cilindro. La regione superiore del tubo centrale non è invece provvista di alcun sistema di raffreddamento. Inoltre notiamo la presenza di una resistenza che si riscalda per il passaggio di una corrente generata da una differenza di potenziale di 10 volt; questa resistenza elettrica fornisce l'energia termica necessaria al funzionamento della macchina come motore. Quando la macchina funziona come macchina frigorifera la resistenza viene sostituita da un termometro.

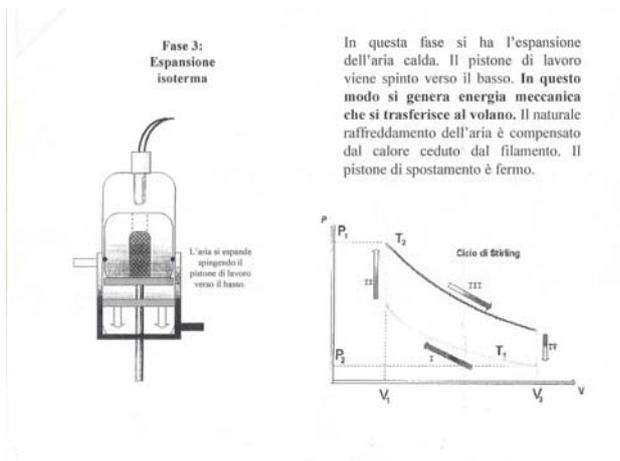
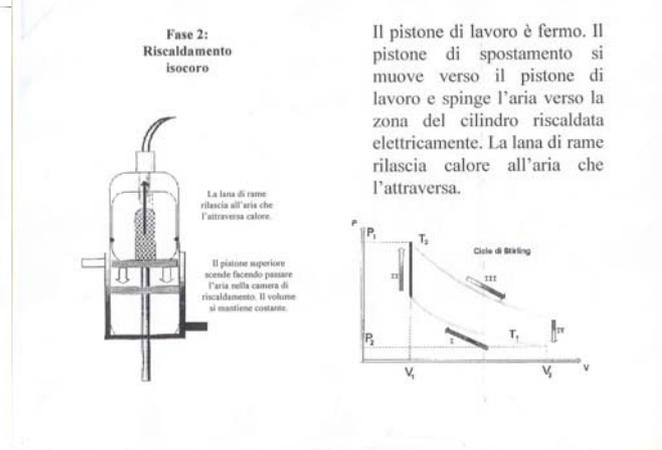
### Schema dei componenti

- 1 e 2 pistoni**
- 3 parte superiore del cilindro non raffreddata**
- 4 camicia di raffreddamento**
- 5 e 6 attacchi per i tubi**
- 7 lana di rame**
- 8 filamento elettrico**
- 9 Volano**
- 10 Eccentrici**
- 11 manometro**



Nel cilindro scorrono due pistoni. Il pistone inferiore serve a comprimere e ad espandere periodicamente l'aria all'interno del cilindro. Il pistone superiore, grazie ad un foro praticato in esso, ha la funzione di trasferire l'aria dalla parte superiore del cilindro alla parte inferiore e viceversa. Notiamo inoltre che all'interno del foro del pistone, per il tempo in cui il motore funziona come macchina termica, è disposta una matassa di lana di rame la cui esistenza è funzionale al bilancio energetico del ciclo. Essa ha, infatti, la funzione di prelevare calore dall'aria che la attraversa provenendo dall'alto e di cederlo all'aria che, invece, fluisce dal basso.

Il ciclo ha inizio con una compressione isoterma in cui il pistone superiore si trova nella parte alta del cilindro mentre il pistone inferiore, muovendosi verso l'alto, produce una compressione dell'aria. Questa, essendo a contatto con le pareti raffreddate dall'acqua, si comprime isotermicamente cedendo calore. Nella seconda fase (trasformazione isocora), il pistone superiore si muove verso il basso consentendo il passaggio dell'aria dalla parte inferiore del cilindro alla parte superiore riscaldata. Successivamente il pistone inferiore scende verso il basso e l'aria, assorbendo calore dalla resistenza elettrica, si espande isotermicamente. Infine, il pistone superiore torna verso l'alto (trasformazione isocora) e l'aria, essendo nuovamente a contatto con le pareti raffreddate del cilindro, si raffredda ritornando alla temperatura iniziale.



Il movimento periodico dei cilindri, secondo le trasformazioni elencate in precedenza, provoca il moto rotatorio dell'asse del motore che, dopo una prima fase di 'riscaldamento', raggiunge una situazione di stabilità. Il raggiungimento dello stato di regime è riconoscibile poiché il numero di giri al minuto compiuti dal motore rimane costante: nel grafico che riporta il numero di giri in funzione del tempo compare di conseguenza un "pianerottolo".

Dal numero di giri del motore  $n$  si determina la velocità angolare  $\omega$ .

La potenza (energia fratto tempo, ma anche forza per velocità) può essere espressa, nel moto rotatorio, come momento della forza per velocità angolare.

Si applica una forza frenante  $F$ , di intensità nota, attraverso l'applicazione di un dinamometro; il momento della forza può essere espresso come forza per braccio.

Noto il diametro dell'albero del motore  $d$ , si ricava il momento frenante  $M_f = F d/2$ .

Si ha quindi una potenza fornita inizialmente  $M\omega$ , che determina la velocità  $\omega$ . Dopo l'applicazione della forza frenante la velocità di rotazione del motore si attesta su un valore inferiore  $\omega'$  (determinato attraverso il conteggio del numero di giri  $n'$  del motore in condizione frenata). La potenza fornita è la stessa di prima, ma la velocità ottenuta è inferiore, perciò parte della potenza fornita deve essere dissipata a causa della forza frenante.

Applicando quindi il teorema di conservazione dell'energia possiamo scrivere:

$$M\omega = M\omega' + M_f\omega'$$

dove  $M_f\omega'$  è la potenza dissipata.

Si ottiene che:

$$M = F d \omega' / 2 (\omega - \omega')$$

da cui la potenza meccanica è:  $P = \mathbf{M} \cdot \boldsymbol{\omega} = \omega \omega' F d/2(\omega - \omega')$   
Si ricava quindi il rendimento.

### Potere refrigerante e calorifero

Quando il motore viene utilizzato a ciclo inverso, come **macchina frigorifera**, se ne determina la bontà di funzionamento espressa dal potere refrigerante. Il potere calorifico, invece, viene determinato quando la macchina funziona come pompa di calore. Nel caso della macchina frigorifera l'attenzione viene più posta sulla quantità di calore che viene sottratto al corpo freddo, mentre nella pompa di calore alla quantità di calore che viene ceduta al corpo caldo. In ambedue i casi l'energia fornita è quella meccanica e l'efficienza della macchina resta espressa dal rapporto fra l'energia (o la potenza) ottenuta rispetto all'energia (o la potenza) fornita:

$$\varepsilon = \text{energia (termica) ottenuta} / \text{energia (meccanica) fornita}$$

Nell'apparato sperimentale la resistenza viene sostituita da un termometro che permette di misurare la variazione di temperatura nel tempo.

Il volano della macchina viene collegato per mezzo di una cinghia ad un motore che fornisce l'energia meccanica necessaria a compiere il ciclo. Il funzionamento del motore può essere utilizzato in due modi:

- il volano ruota in senso orario e la macchina assorbe calore dall'aria che si trova nella parte superiore del cilindro, a temperatura più bassa, cedendolo all'acqua contenuta nell'intercapedine di raffreddamento (che è a temperatura maggiore). Il termometro mostra una diminuzione di temperatura dell'aria. In questa fase la macchina funziona come macchina frigorifera.
- il volano ruota in senso antiorario e la macchina (che ora è una pompa di calore) assorbe calore dall'acqua trasferendolo all'aria, nella regione più alta del cilindro, che quindi progressivamente si riscalda.

La variazione di temperatura è però a sua volta legata, in proporzionalità diretta, alla quantità di calore che viene scambiata, secondo la seguente espressione:

$$\Delta Q / \Delta t = c (\Delta T / \Delta t)$$

dove  $\Delta T / \Delta t$  è la rapidità con cui varia la temperatura e  $c$  è una costante del motore.

Esistendo quindi una proporzionalità diretta tra potere refrigerante (e calorifero) e rapidità di variazione della temperatura, la misura di  $\Delta T / \Delta t$  permette di determinare il potere refrigerante  $\Delta Q / \Delta t$ .