

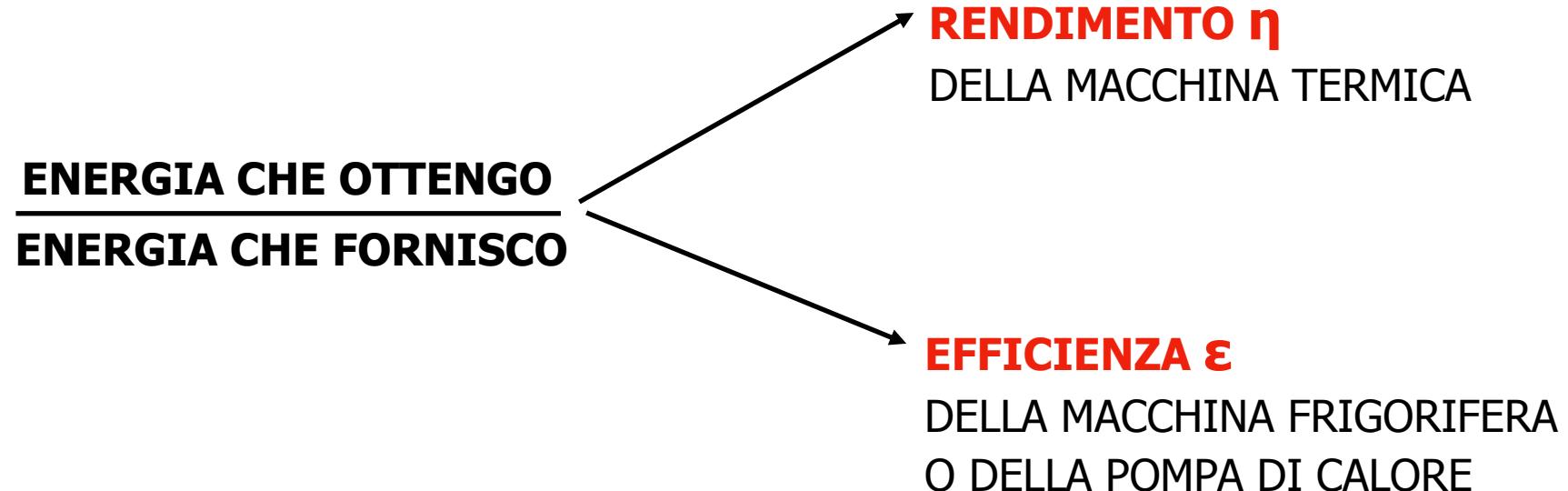
MOTORE DI STIRLING

Esperimentazioni I
a.a. 2023-2024

OBIETTIVI

- Calcolare il **rendimento del motore** in seguito alla realizzazione di un **ciclo termico**
- Calcolare e confrontare le **efficienze** quando il motore funziona come **macchina frigorifera** o come **pompa di calore**

Rendimento e efficienza



Potenza = Energia / tempo



Posso ricavare η e ϵ usando le potenze invece delle energie

Motore di Stirling macchina termica



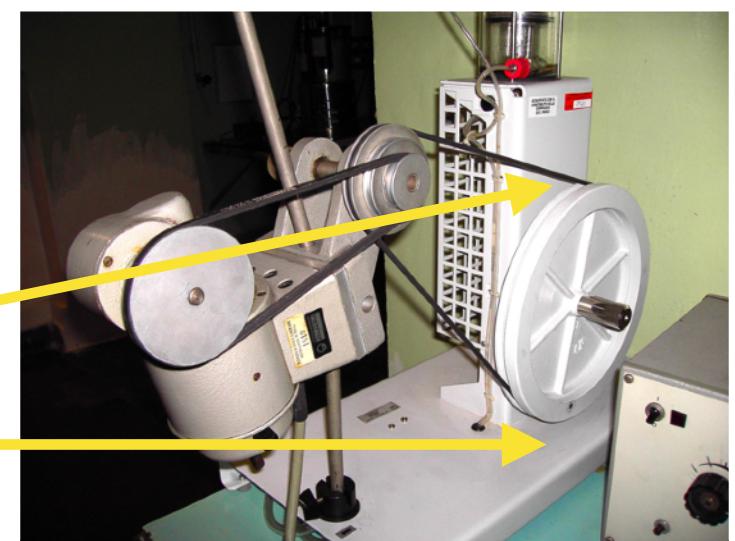
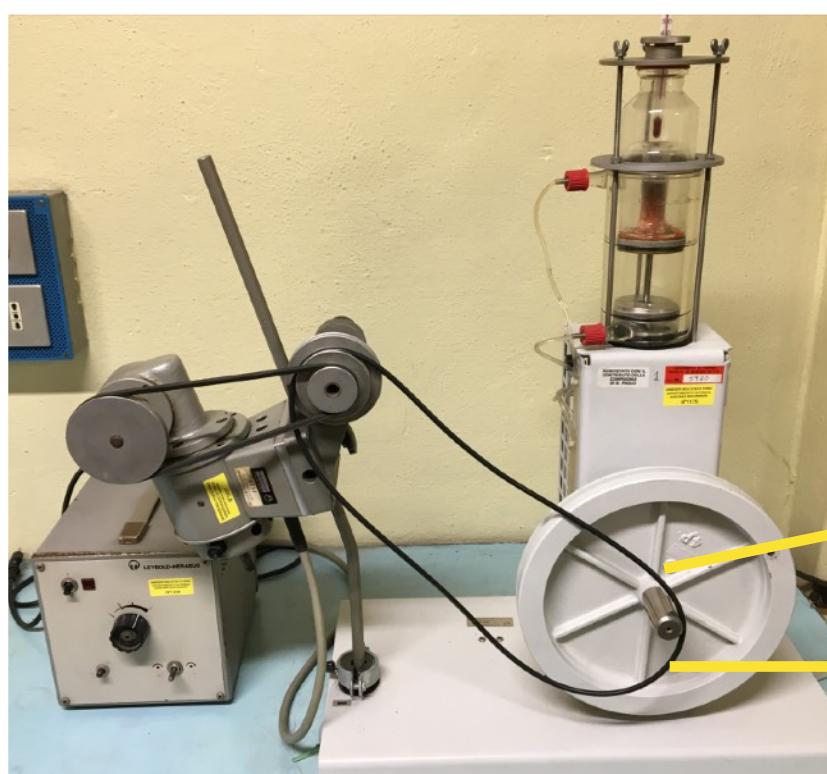
- **Macchina termica** in grado di trasformare **energia termica** in **energia meccanica**

Motore di Stirling macchina termica



- **Macchina termica** in grado di trasformare **energia termica** in **energia meccanica**

Motore di Stirling macchina frigorifera (o pompa di calore)



- Quando però venga fornita **energia meccanica**, può funzionare come **macchina frigorifera**, assorbendo **calore** da un corpo freddo e trasferendolo ad uno più caldo

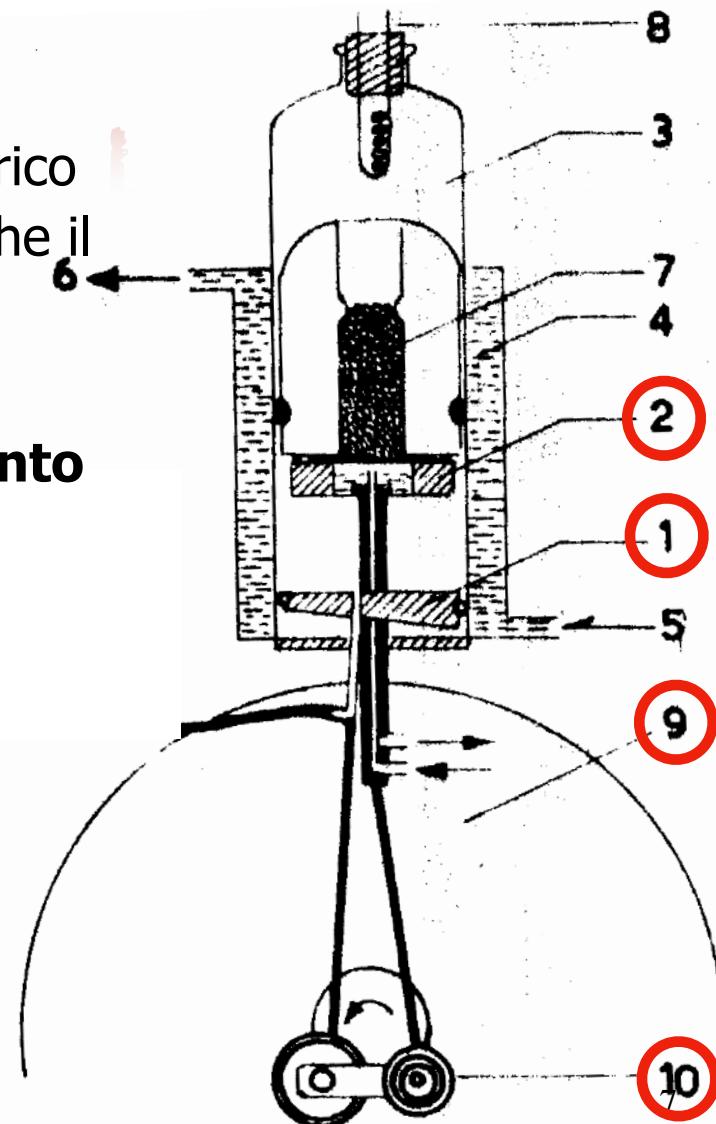
Schema dei componenti

[1] **Pistone di lavoro** e [2] **pistone di spostamento (forato)**, collegati ad un eccentrico [10], impenniato sul volano [9], in modo tale che il loro movimento sia sfasato di 90°

[3] Parte superiore del cilindro, con [8] **filamento elettrico** (alimentato con $P=V*i$ note)

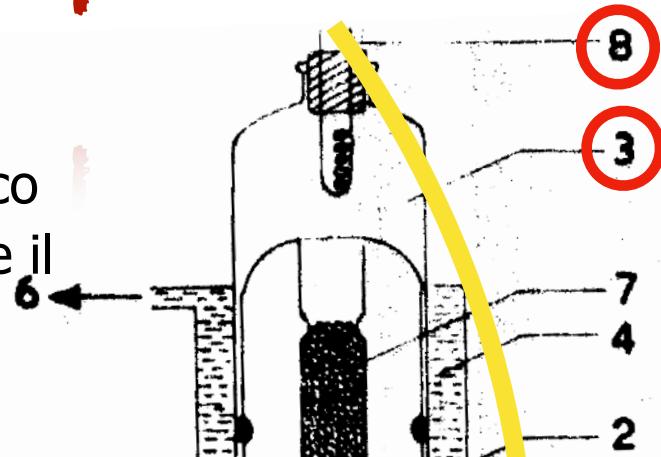
[4] **Camicia di raffreddamento** in cui si fa scorrere l'acqua mediante tubicini connessi agli attacchi [5 e 6]

[7] **Lana di rame** = rigeneratore o scambiatore termico



Schema dei componenti

[1] **Pistone di lavoro** e [2] **pistone di spostamento** (forato), collegati ad un eccentrico [10], impenniato sul volano [9], in modo tale che il loro movimento sia sfasato di 90°



[3] Parte superiore del cilindro, con [8] **filamento elettrico** (alimentato con $P=V \cdot i$ note)



[4] **Camicia di raffreddamento** in cui si fa scorrere l'acqua mediante tubicini connessi agli attacchi [5 e 6]

[7] **Lana di rame** = rigeneratore o scambiatore termico

Schema dei componenti

[1] **Pistone di lavoro** e [2] **pistone di spostamento** (forato), collegati ad un eccentrico [10], impenniato sul volano [9], in modo tale che il loro movimento sia sfasato di 90°



[3] Parte superiore del cilindro, con [8] **filamento elettrico** (alimentato con $P=V^*i$ note)



[4] **Camicia di raffreddamento** in cui si fa scorrere l'acqua mediante tubicini connessi agli attacchi [5 e 6]

[7] **Lana di rame** = rigeneratore o scambiatore termico



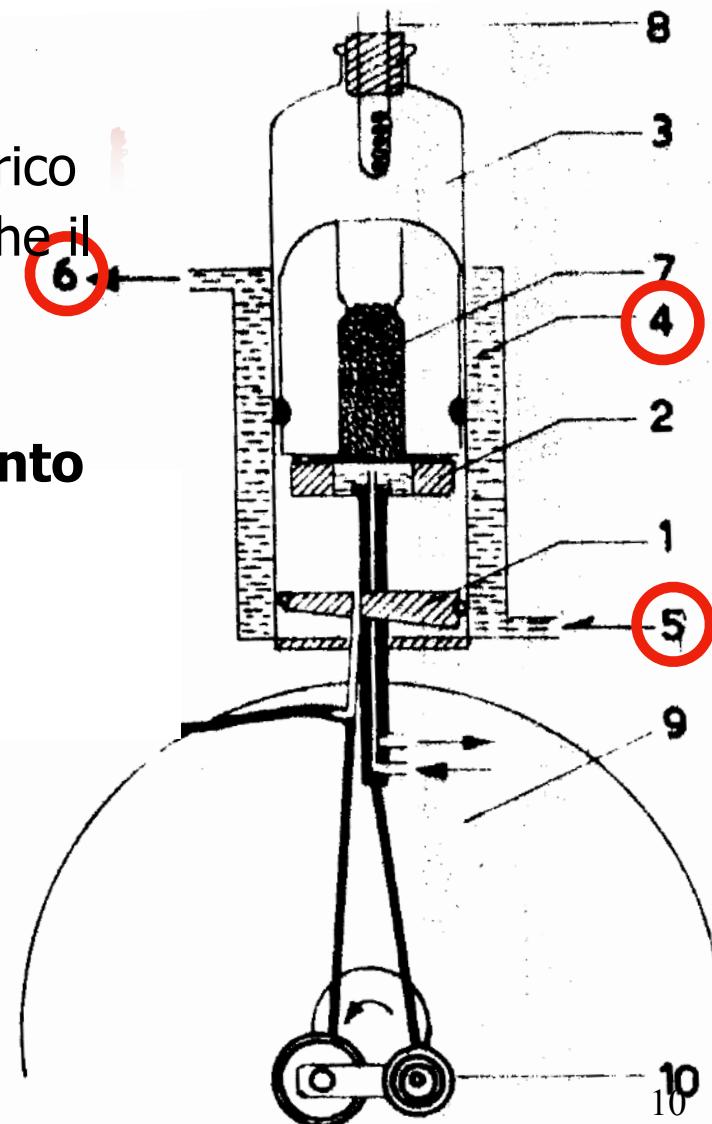
Schema dei componenti

[1] **Pistone di lavoro** e [2] **pistone di spostamento** (forato), collegati ad un eccentrico [10], impenniato sul volano [9], in modo tale che il loro movimento sia sfasato di 90°

[3] Parte superiore del cilindro, con [8] **filamento elettrico** (alimentato con $P=V*i$ note)

[4] **Camicia di raffreddamento** in cui si fa scorrere l'acqua mediante tubicini connessi agli attacchi [5 e 6]

[7] **Lana di rame** = rigeneratore o scambiatore termico



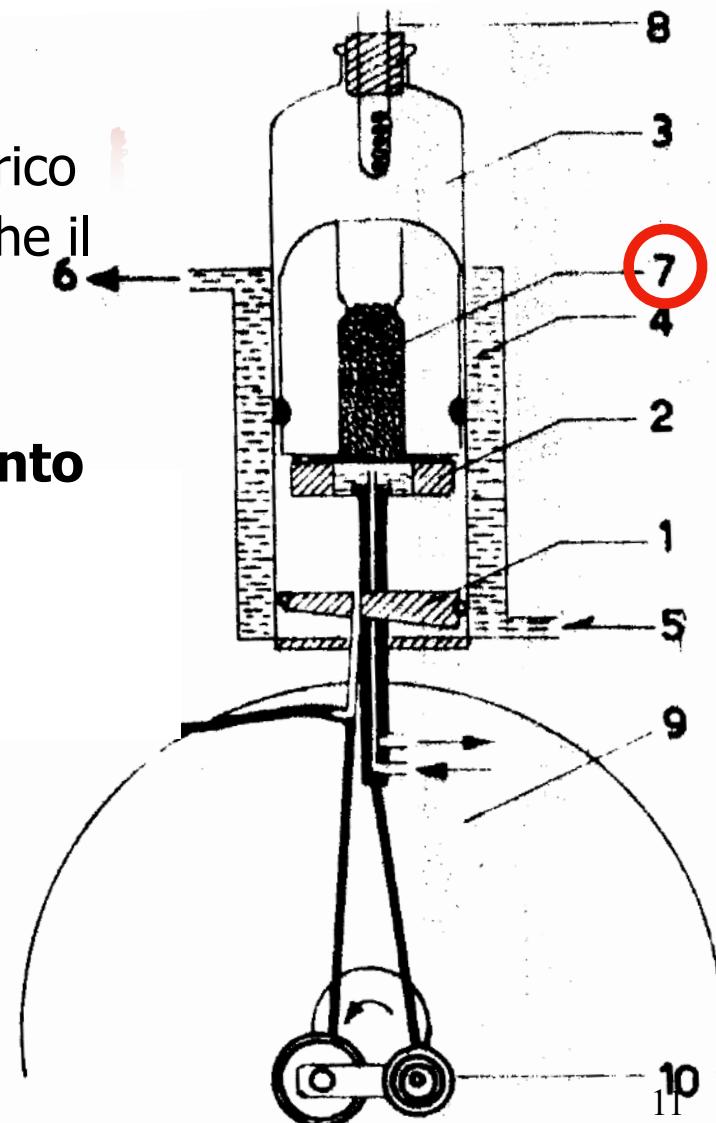
Schema dei componenti

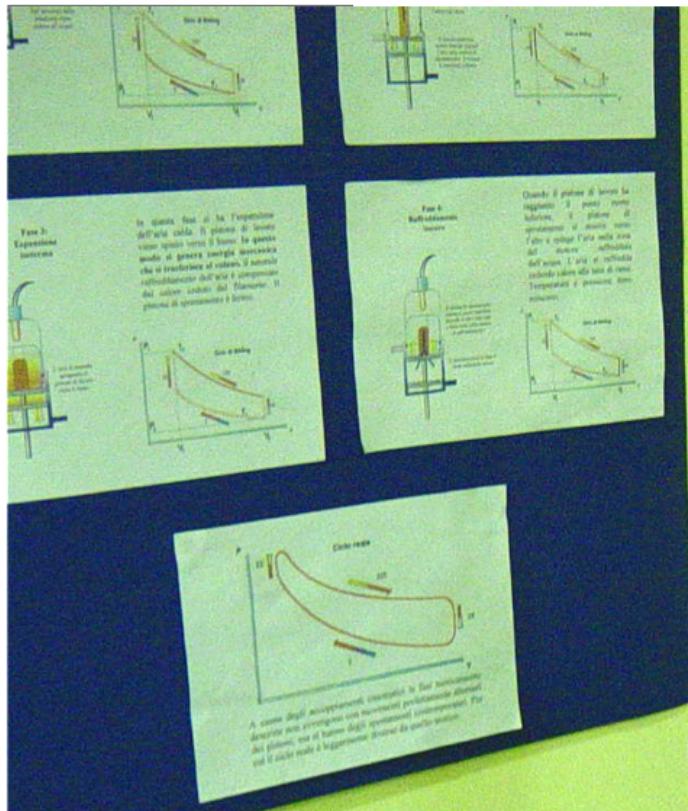
[1] **Pistone di lavoro** e [2] **pistone di spostamento** (forato), collegati ad un eccentrico [10], impenniato sul volano [9], in modo tale che il loro movimento sia sfasato di 90°

[3] Parte superiore del cilindro, con [8] **filamento elettrico** (alimentato con $P=V*i$ note)

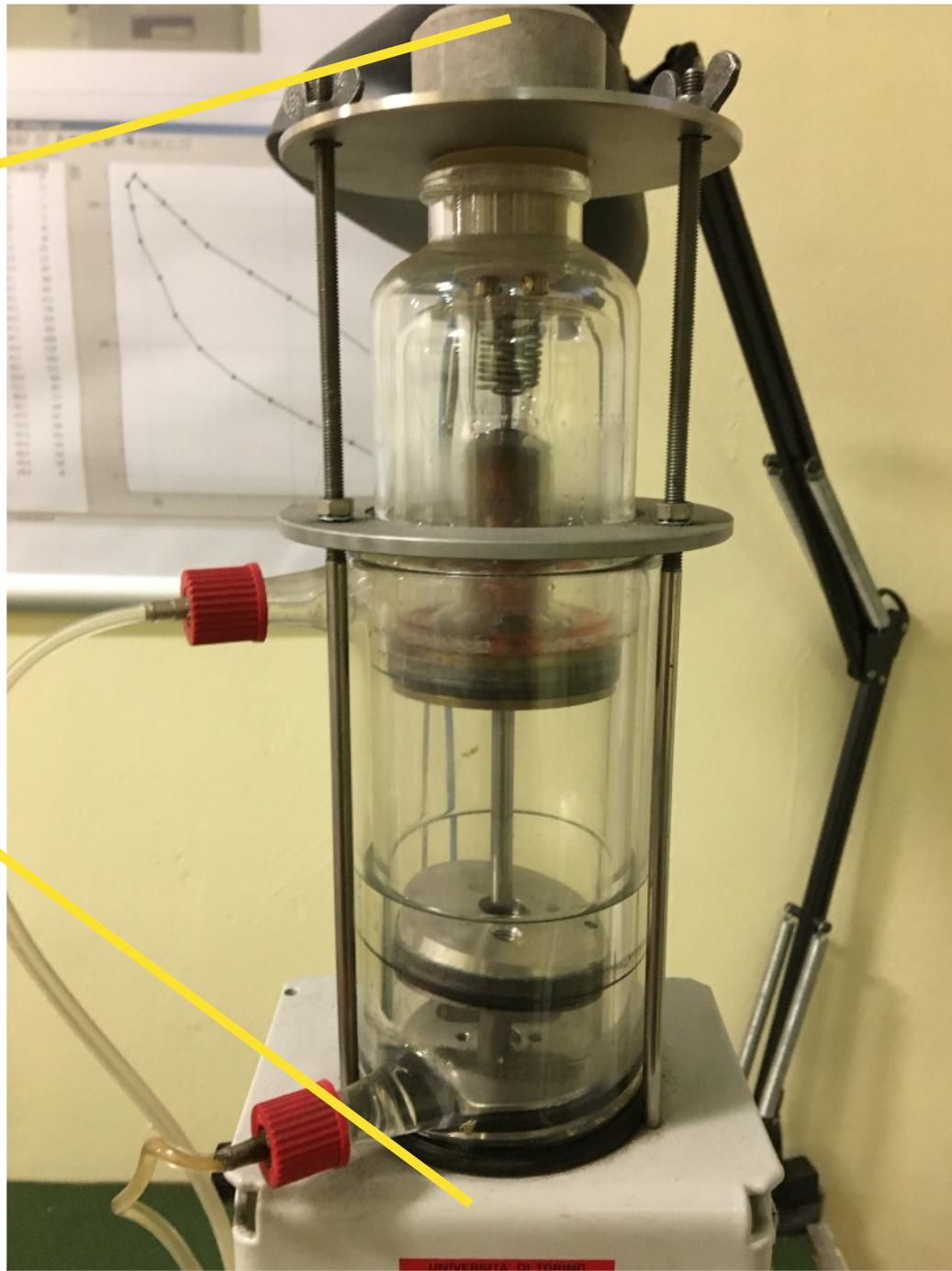
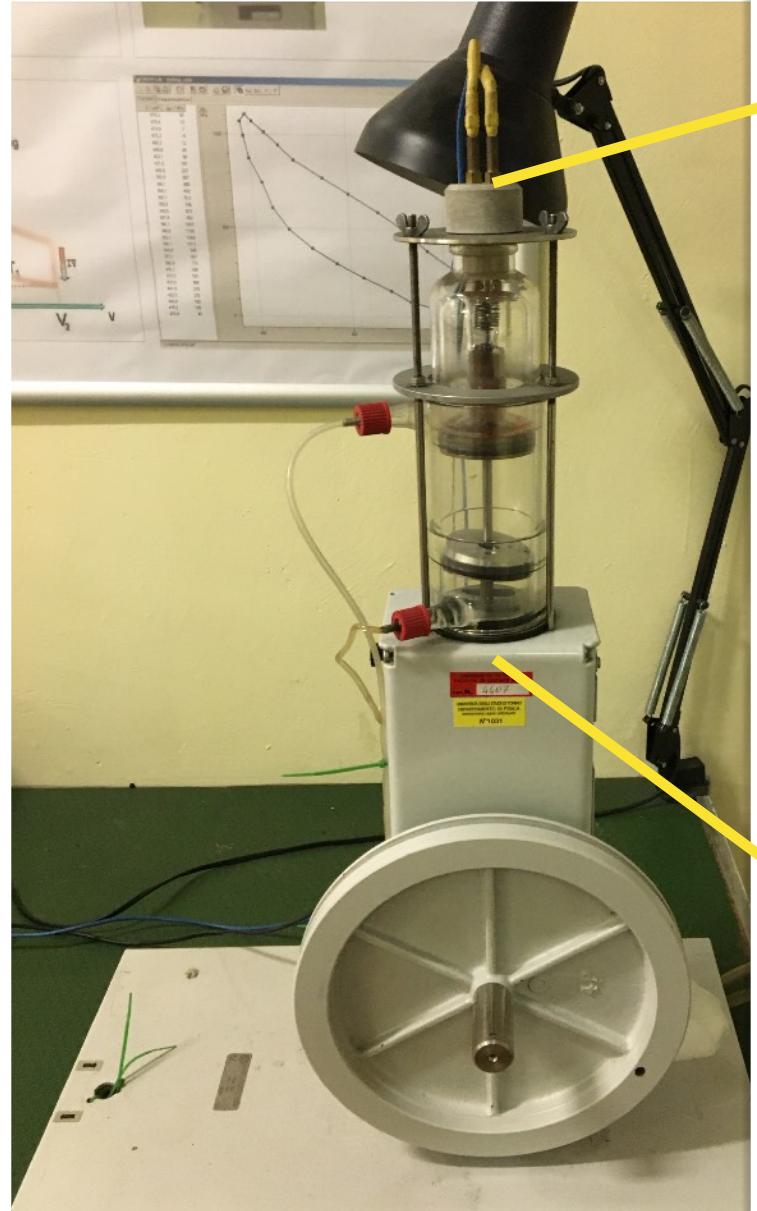
[4] **Camicia di raffreddamento** in cui si fa scorrere l'acqua mediante tubicini connessi agli attacchi [5 e 6]

[7] **Lana di rame** = rigeneratore o scambiatore termico









Ciclo Termodinamico

- Se si vuole prolungare nel tempo l'effetto di un fenomeno, ci si deve riportare periodicamente al punto di partenza.

Ripetizione periodica
di una serie di fenomeni



CICLO

Successione di trasformazioni
termodinamiche, che riportano
allo stato di partenza



CICLO
TERMODINAMICO

Trasformazioni termodin.

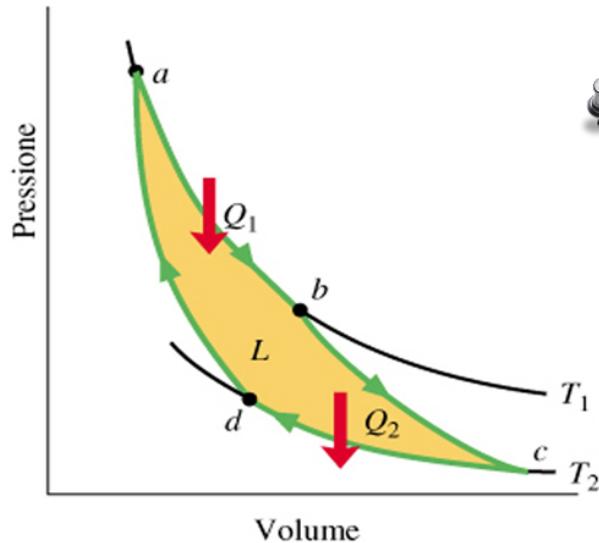
Uno **stato termodinamico** è definito da

```
graph LR; A[Uno stato termodinamico è definito da] --> p[pressione p]; A --> V[volume V]; A --> T[temperatura T];
```

- ➊ I passaggi da uno stato termodinamico all'altro costituiscono le **TRASFORMAZIONI TERMODINAMICHE**

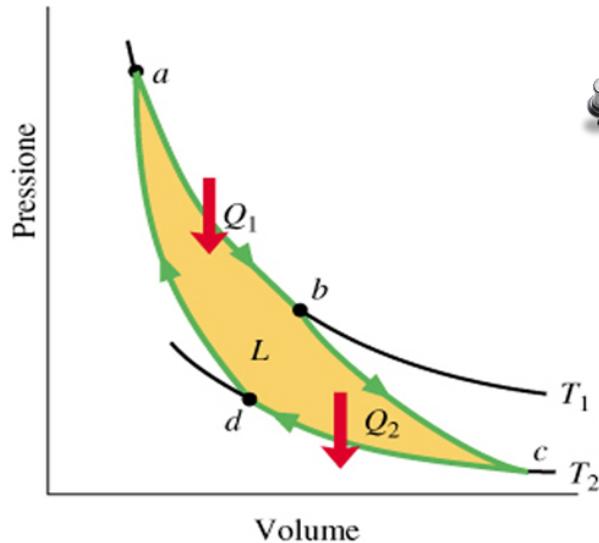
- ➋ Le trasformazioni possono avvenire mantenendo:
 - ➌ Volume costante \Rightarrow **ISOCORA**
 - ➌ Pressione costante \Rightarrow **ISOBARA**
 - ➌ Temperatura costante \Rightarrow **ISOTERMA**

Cicli Carnot e Stirling



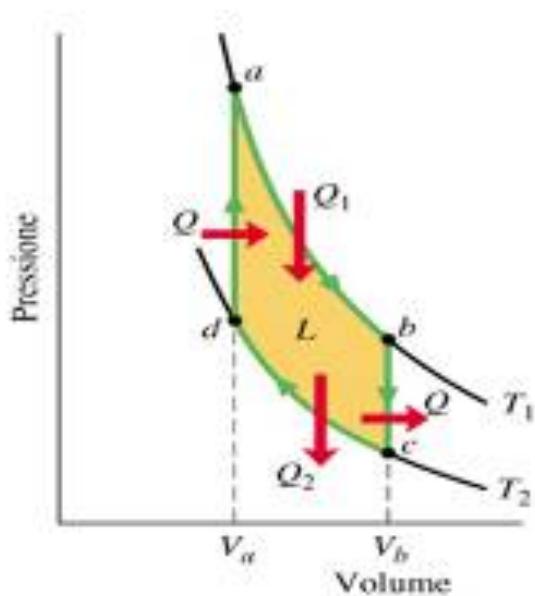
- **Ciclo Carnot:** da una isoterma all'altra con **trasformazioni adiabatiche** (senza scambi di Q)
- $L = Q_1 - Q_2 \rightarrow \eta = \frac{L}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$

Cicli Carnot e Stirling



- **Ciclo Carnot:** da una isoterma all'altra con **trasformazioni adiabatiche** (senza scambi di Q)

$$\bullet L = Q_1 - Q_2 \rightarrow \eta = \frac{L}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

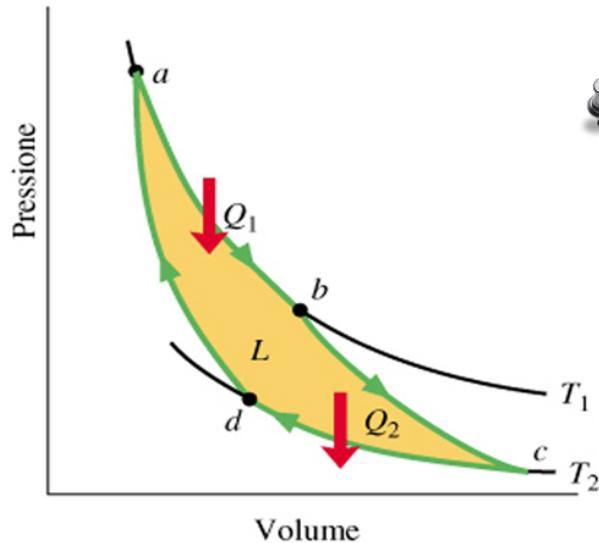


- **Ciclo Stirling:** da una isoterma all'altra con **trasformazioni isocore** (con scambio di Q)

- Nel nostro motore Q ceduto viene trattenuto nella lana di rame ("scambiatore termico")
→ $|Q_{ad}| = |Q_{bc}| = Q$
- Ciclo Stirling equiparato a ciclo Carnot:

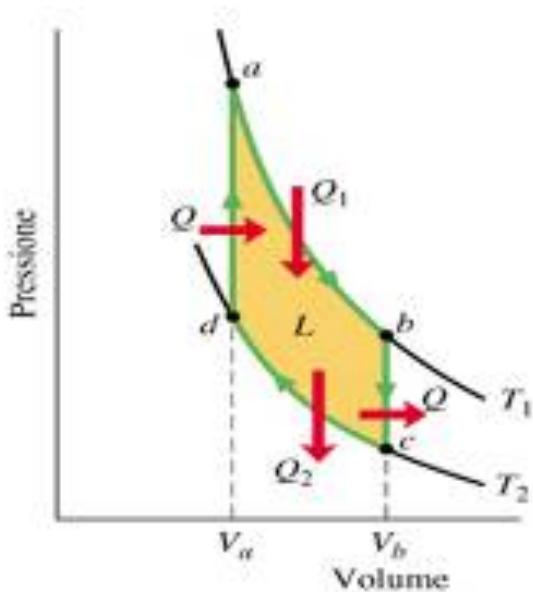
$$\eta = \frac{L}{Q_1} = \frac{(Q_1 + Q) - (Q_2 + Q)}{Q_1}$$

Cicli Carnot e Stirling



- **Ciclo Carnot:** da una isoterma all'altra con **trasformazioni adiabatiche** (senza scambi di *Q*)

$$\bullet L = Q_1 - Q_2 \rightarrow \eta = \frac{L}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$



- **Ciclo Stirling:** da una isoterma all'altra con **trasformazioni isocore** (con scambio di *Q*)

- Nel nostro motore *Q* ceduto viene trattenuto nella lana di rame ("scambiatore termico")
→ $|Q_{ad}| = |Q_{bc}| = Q$
- Ciclo Stirling equiparato a ciclo Carnot:

$$\eta = \frac{L}{Q_1} = \frac{(Q_1 + \cancel{Q}) - (Q_2 + \cancel{Q})}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

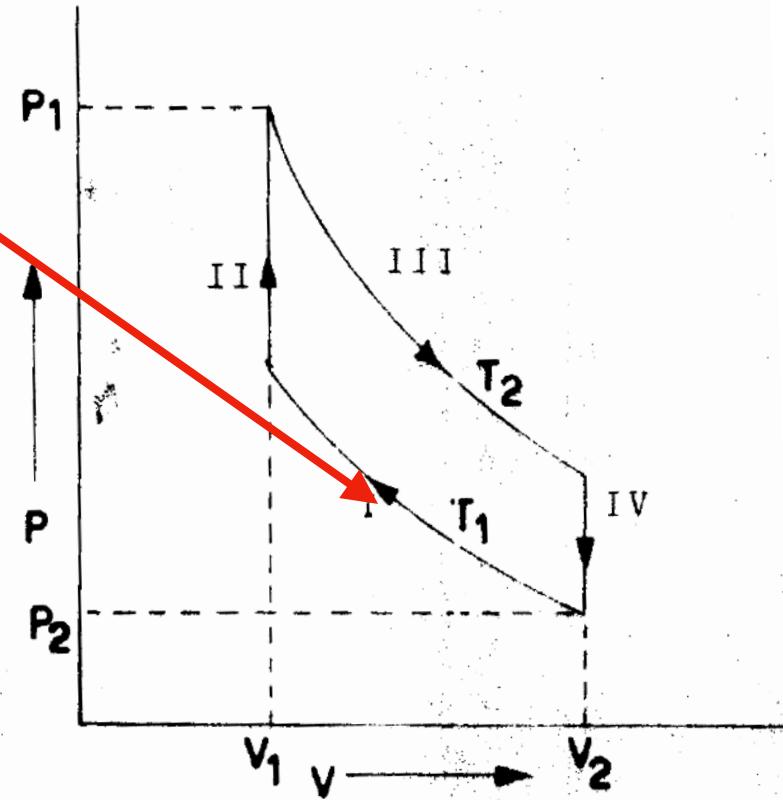
Fasi del ciclo

- **Trasformazione isotermica:**
con aumento di p e diminuzione di V

- **Trasformazione isocora:**
con aumento di T e di p

- **Trasformazione isotermica:**
con aumento di V e diminuzione di p

- **Trasformazione isocora:**
con diminuzione di T e di p



Fasi del ciclo

- **Trasformazione isotermica:**

con aumento di p e diminuzione di V

- **Trasformazione isocora:**

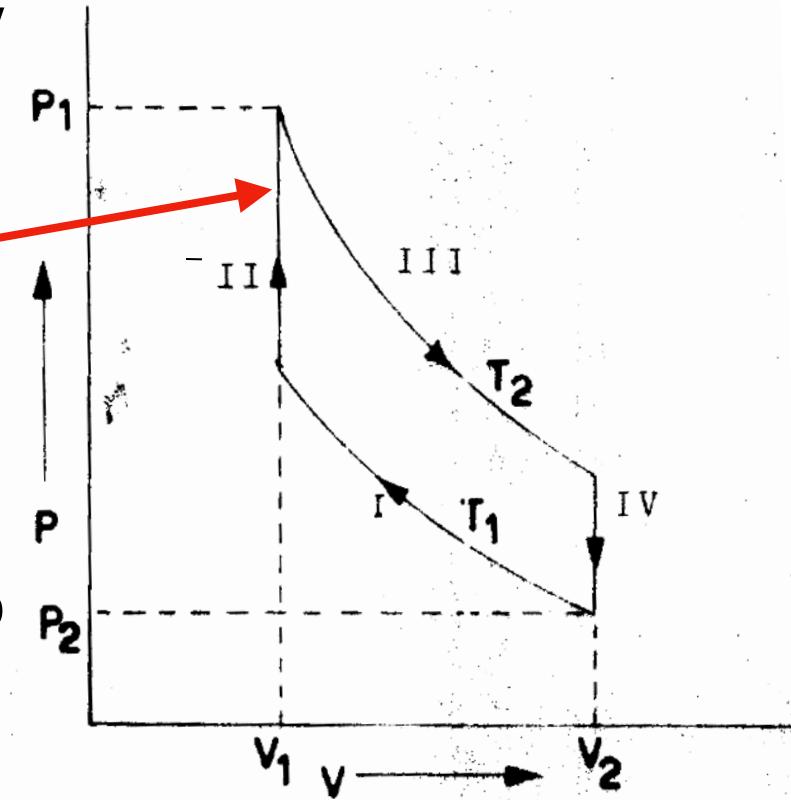
con aumento di T e di p

- **Trasformazione isotermica:**

con aumento di V e diminuzione di p

- **Trasformazione isocora:**

con diminuzione di T e di p



Fasi del ciclo



Trasformazione isoterna:

con aumento di p e diminuzione di V



Trasformazione isocora:

con aumento di T e di p



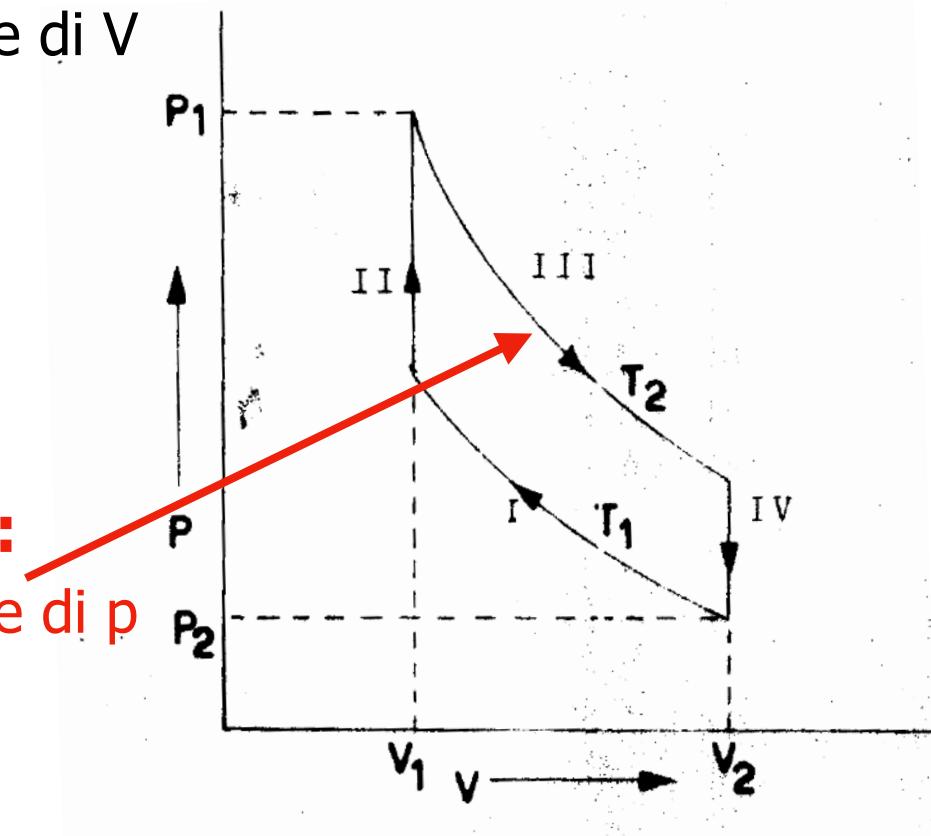
Trasformazione isoterna:

con aumento di V e diminuzione di p



Trasformazione isocora:

con diminuzione di T e di p



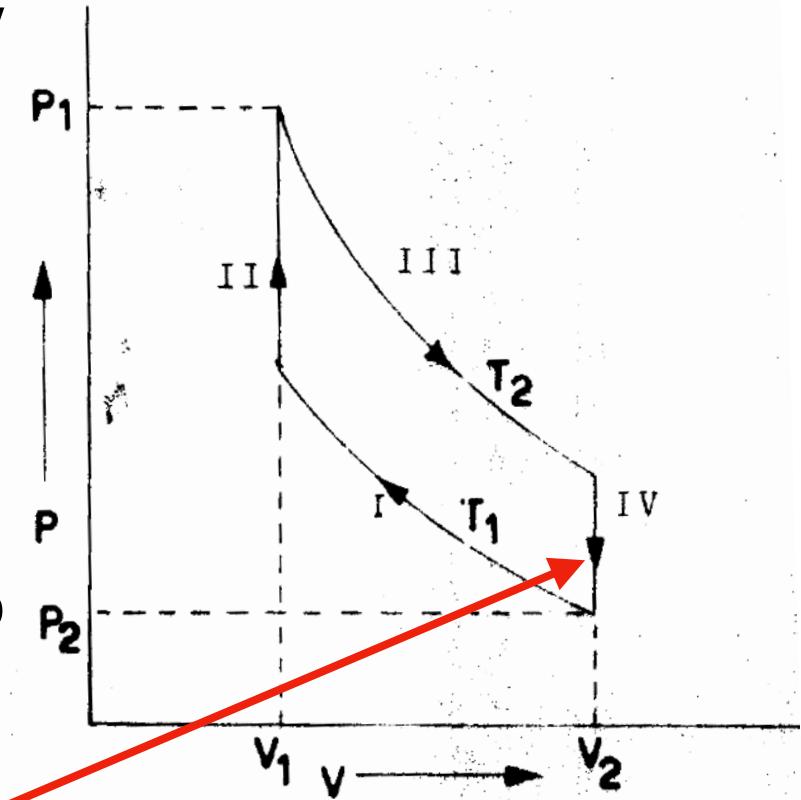
Fasi del ciclo

- **Trasformazione isotermica:**
con aumento di p e diminuzione di V

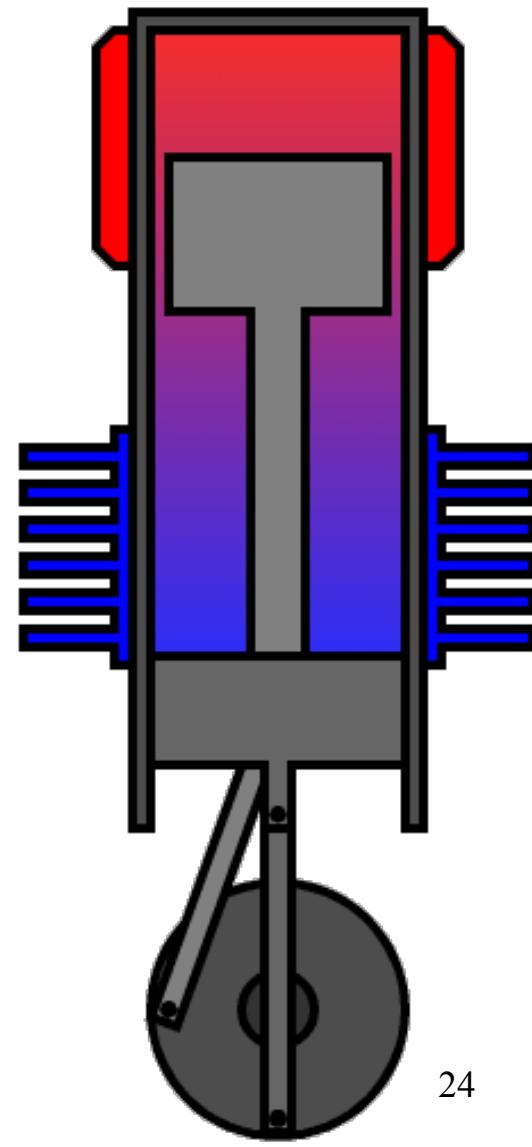
- **Trasformazione isocora:**
con aumento di T e di p

- **Trasformazione isotermica:**
con aumento di V e diminuzione di p

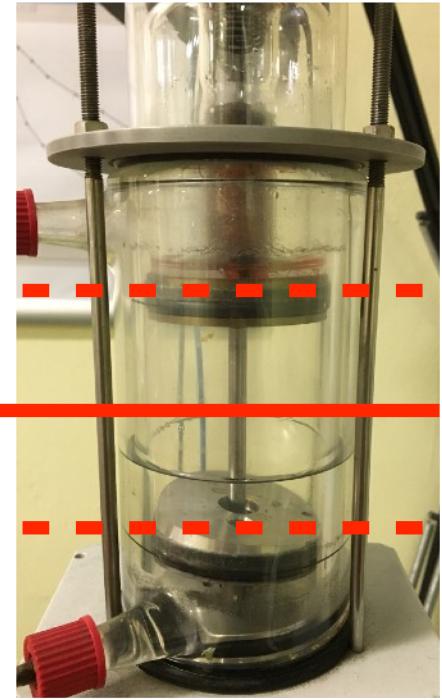
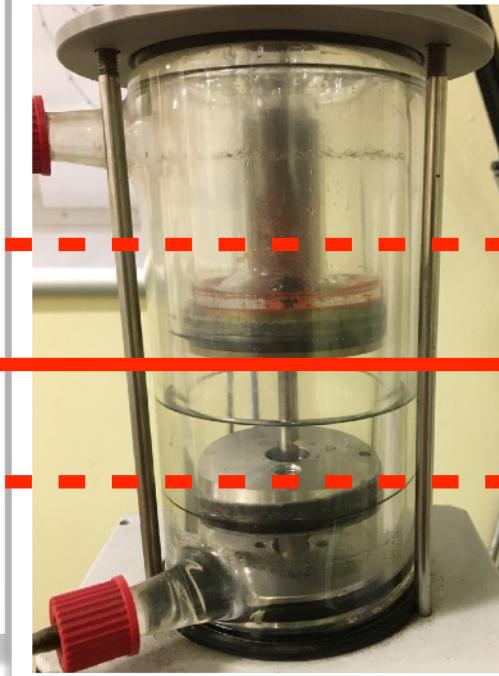
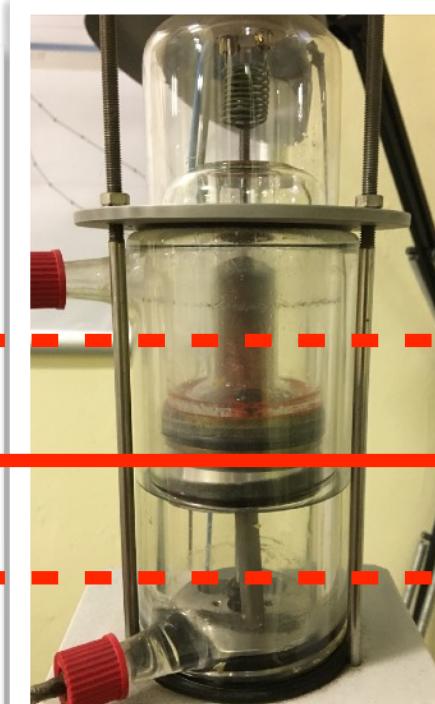
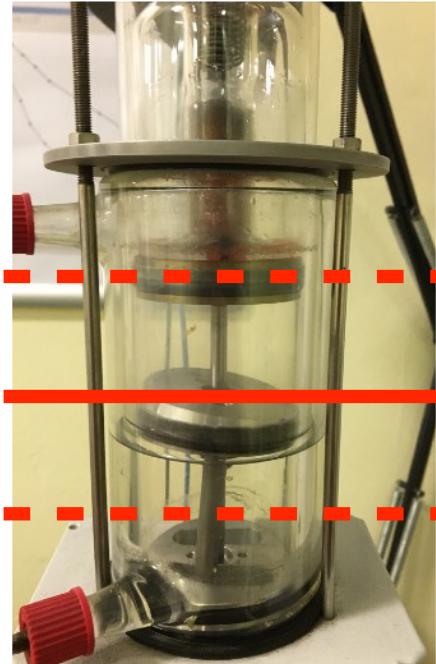
- **Trasformazione isocora:**
con diminuzione di T e di p



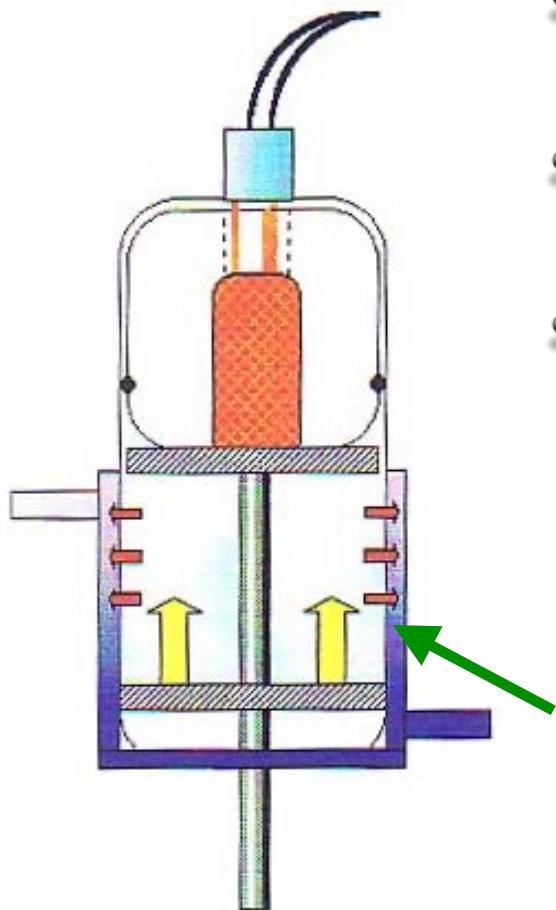
Fasi del ciclo



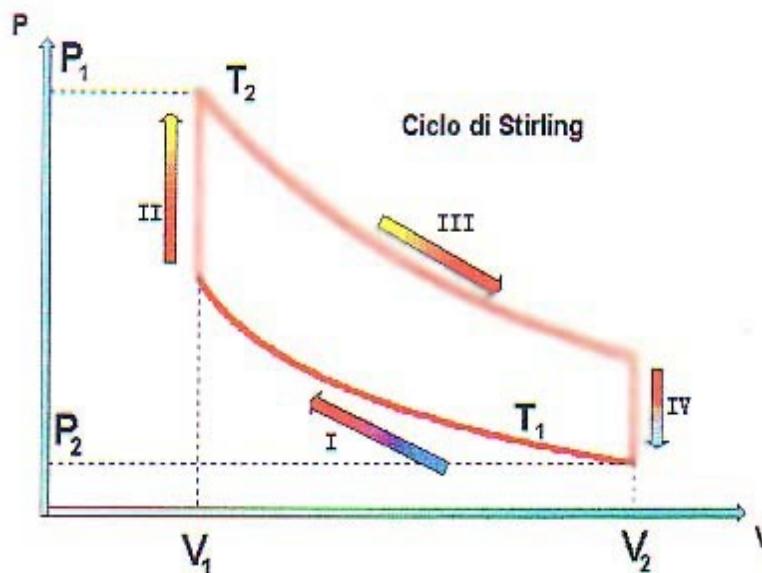
Fasi del ciclo



Fase 1: compressione isoterma



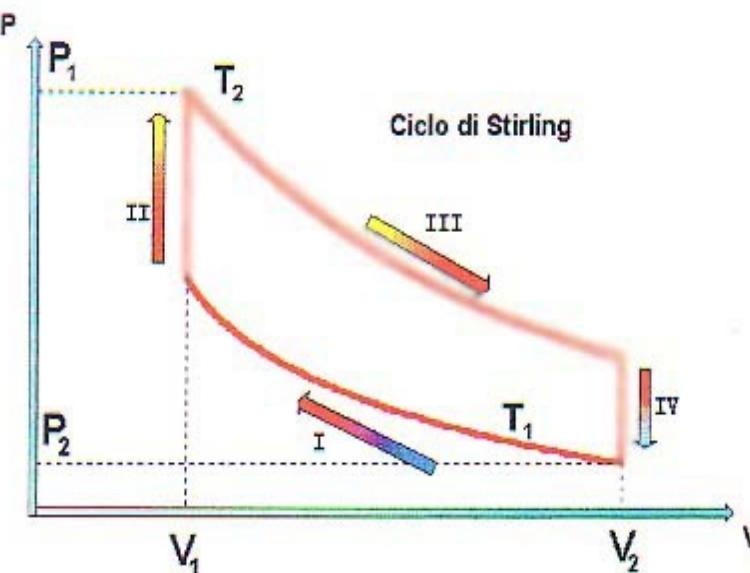
- Il **pistone di lavoro** si sposta verso l'alto, comprimendo l'aria.
- Il **pistone di spostamento** è fermo nella zona superiore del cilindro.
- Il calore sviluppato per compressione è ceduto all'acqua di raffreddamento $\Rightarrow T_1 = \text{cost}$



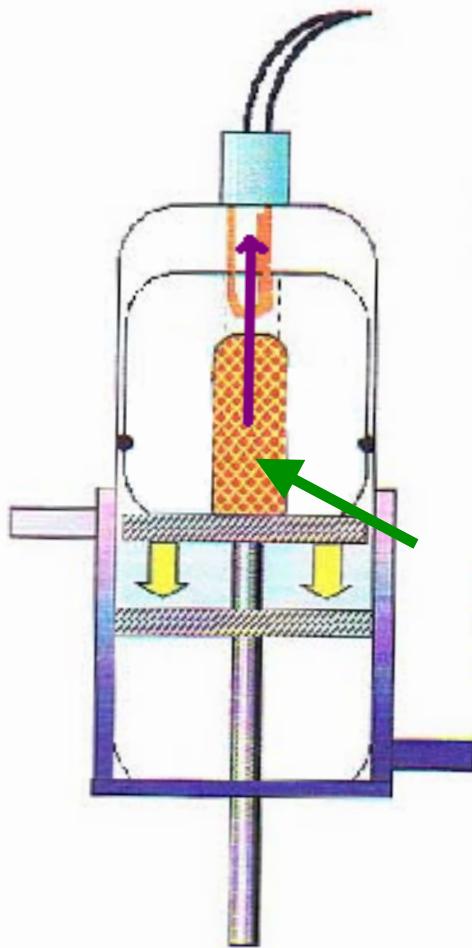
Fase 1: compressione isoterma



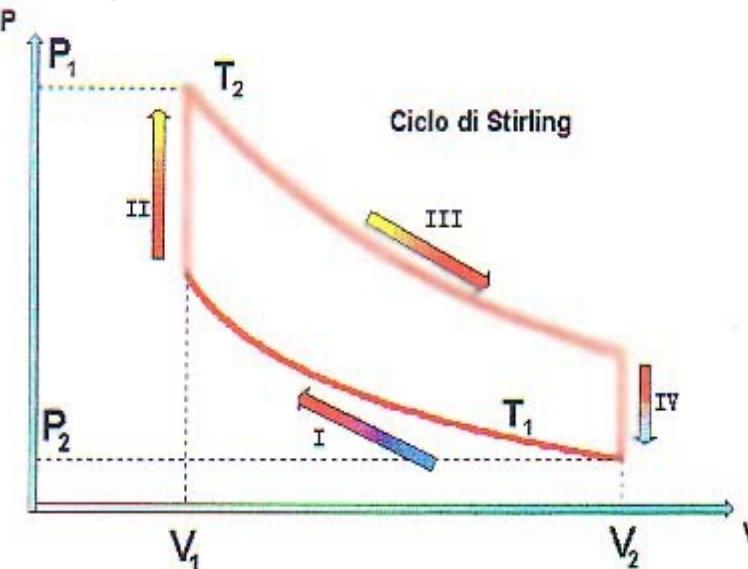
- Il **pistone di lavoro** si sposta verso l'alto, comprimendo l'aria.
- Il **pistone di spostamento** è fermo nella zona superiore del cilindro.
- Il calore sviluppato per compressione è ceduto all'acqua di raffreddamento $\Rightarrow T_1 = \text{cost}$



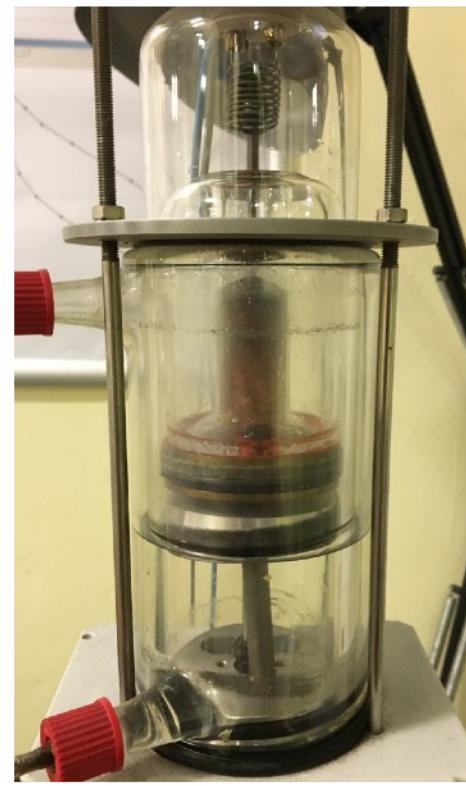
Fase 2: riscaldamento isocoro



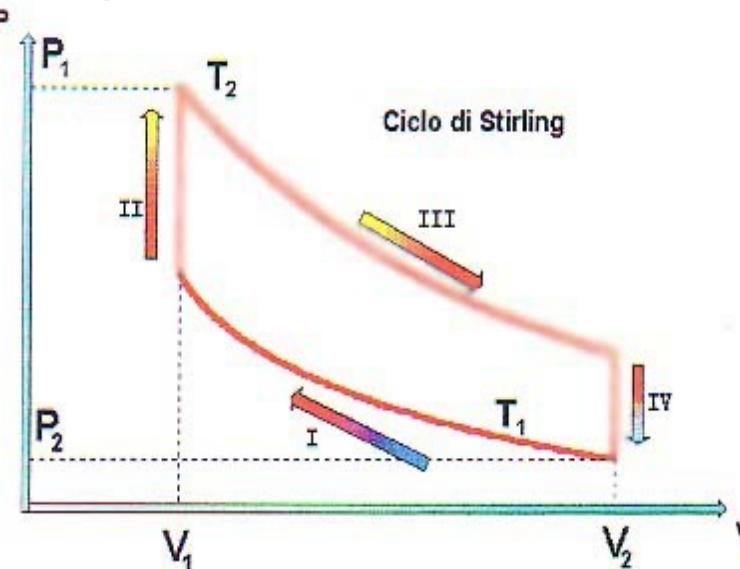
- Il **pistone di lavoro** è fermo.
- Il **pistone di spostamento** si muove verso il basso e fa passare l'aria attraverso la sua cavità contenente lana di rame (spostandola verso l'alto)
- Passando attraverso la **lana di rame**, l'aria assorbe calore (immagazzinato nel ciclo precedente) $\Rightarrow T_1 \rightarrow T_2$



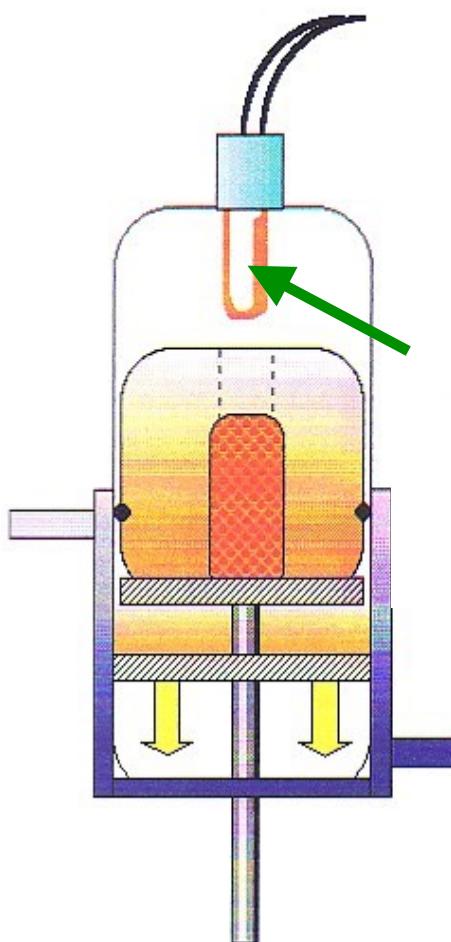
Fase 2: riscaldamento isocoro



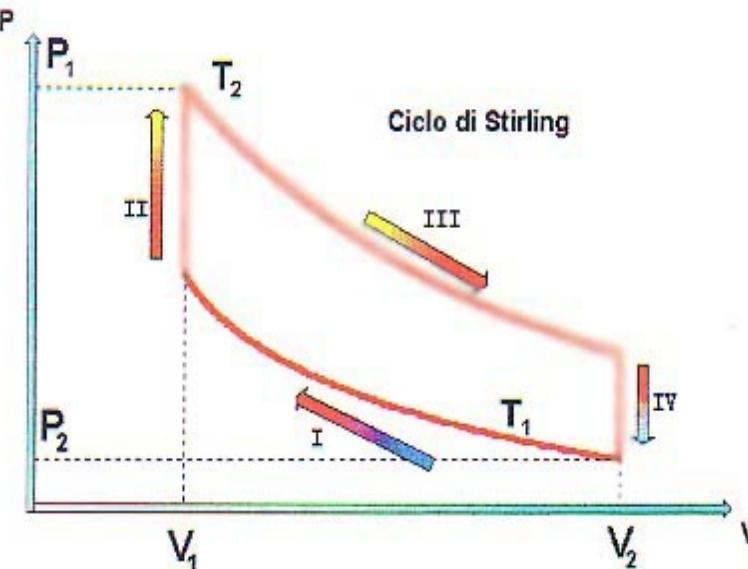
- Il **pistone di lavoro** è fermo.
- Il **pistone di spostamento** si muove verso il basso e fa passare l'aria attraverso la sua cavità contenente lana di rame (spostandola verso l'alto)
- Passando attraverso la **lana di rame**, l'aria assorbe calore (immagazzinato nel ciclo precedente) $\Rightarrow T_1 \rightarrow T_2$



Fase 3: espansione isoterma



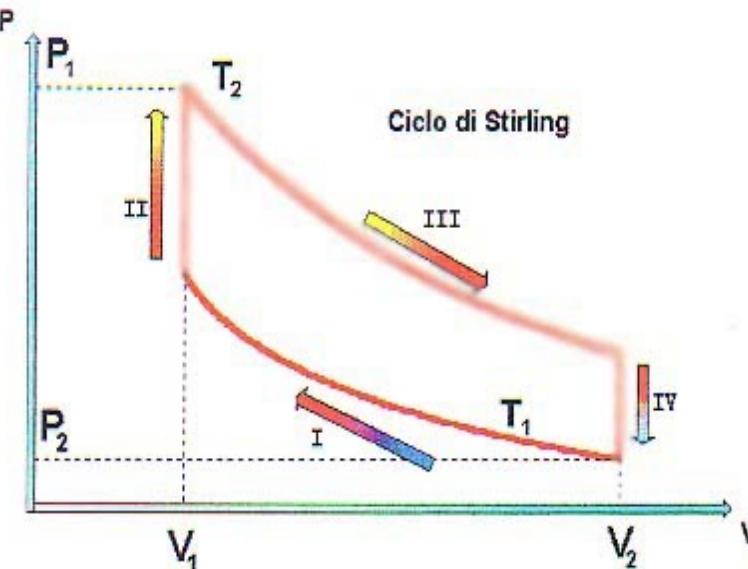
- Il **pistone di lavoro** viene spinto verso il basso dall'espansione dell'aria calda.
- Si **genera** così **energia meccanica** che viene trasferita al volano → **fase attiva**
- Il **pistone di spostamento** è fermo.
- Il naturale raffreddamento dell'aria è compensato dal Q ceduto dal **filamento** ⇒ $T_2 = \text{cost}$



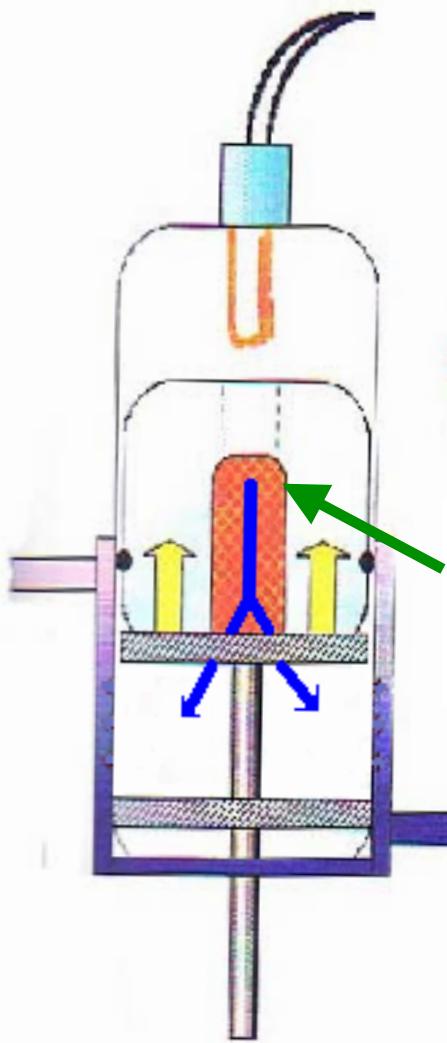
Fase 3: espansione isoterma



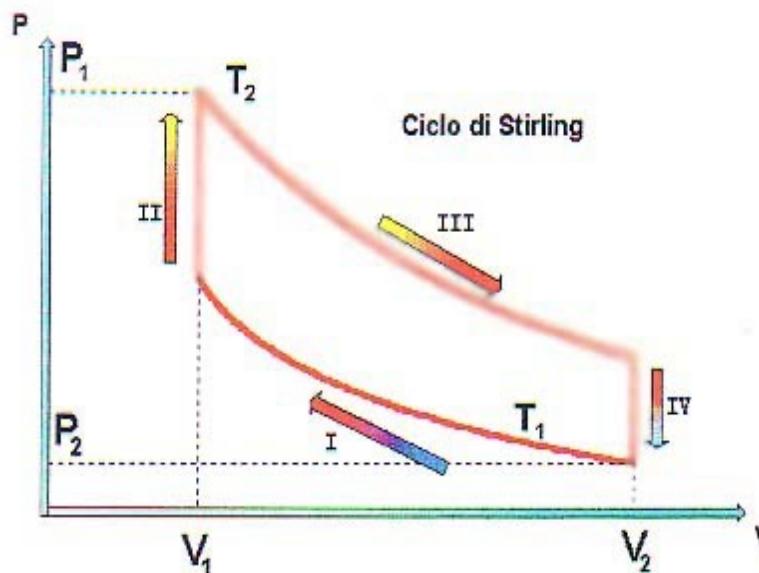
- Il **pistone di lavoro** viene spinto verso il basso dall'espansione dell'aria calda.
- Si **genera** così **energia meccanica** che viene trasferita al volano → **fase attiva**
- Il **pistone di spostamento** è fermo.
- Il naturale raffreddamento dell'aria è compensato dal Q ceduto dal **filamento** ⇒ $T_2 = \text{cost}$



Fase 4: raffreddamento isocoro



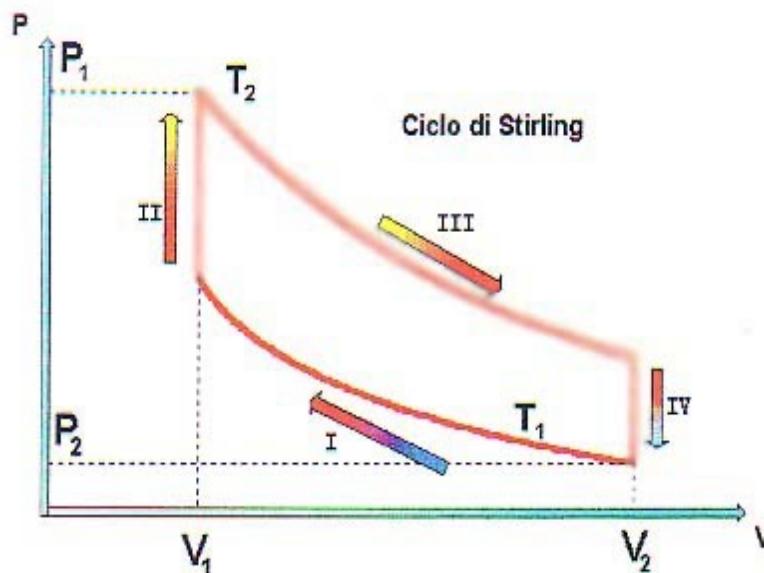
- Quando il **pistone di lavoro** ha raggiunto il punto morto inferiore, il **pistone di spostamento** si muove verso l'alto e sposta l'aria nella zona inferiore del cilindro (fredda).
- L'aria si raffredda cedendo calore alla **lana di rame** (T e p diminuiscono) $\Rightarrow T_2 \rightarrow T_1$



Fase 4: raffreddamento isocoro



- Quando il **pistone di lavoro** ha raggiunto il punto morto inferiore, il **pistone di spostamento** si muove verso l'alto e sposta l'aria nella zona inferiore del cilindro (fredda).
- L'aria si raffredda cedendo calore alla **lana di rame** (T e p diminuiscono) $\Rightarrow T_2 \rightarrow T_1$



PRIMA PARTE

Misura del rendimento con
il metodo del freno
dinamometrico

Funzionamento come macchina termica

Potenza meccanica

del motore P_M calcolata dai dati sperimentali



Potenza ottenuta

Potenza elettrica

che fa girare il motore P_E
letta sul wattmetro



Potenza fornita

Procedura sperimentale

- ➡ Si mette in funzione il motore alimentando la resistenza e imprimendo una spinta iniziale



Procedura sperimentale

- Si mette in funzione il motore alimentando la resistenza e imprimendo una spinta iniziale
- Si misura la frequenza di rotazione libera del motore con il **contagiri**



Procedura sperimentale

- Si mette in funzione il motore alimentando la resistenza e imprimendo una spinta iniziale
- Si misura la frequenza di rotazione libera del motore con il **contagiri**

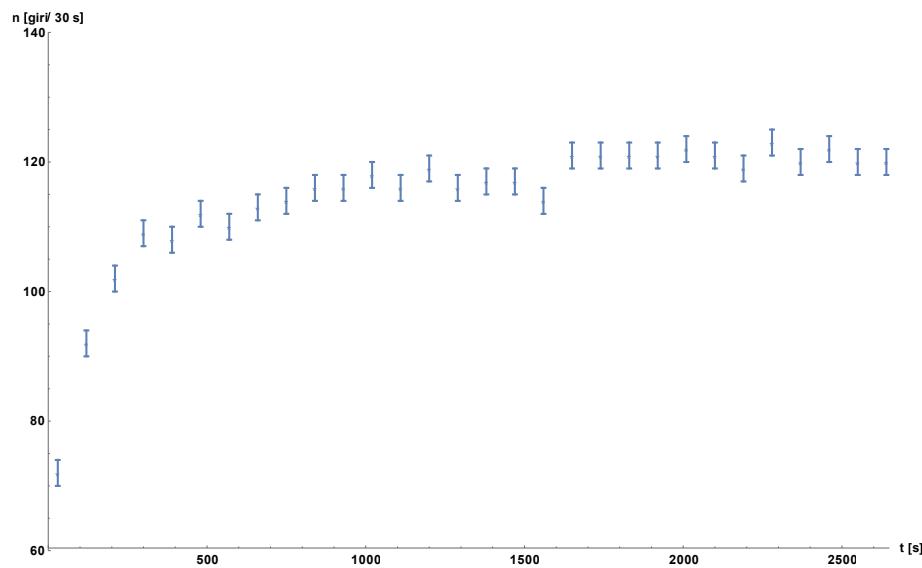


Procedura sperimentale

- 📌 Si mette in funzione il motore alimentando la resistenza e imprimendo una spinta iniziale
- 📌 Si misura la frequenza di rotazione libera del motore con il **contagiri**
- 📌 Si misura il numero di giri per 30 secondi ad intervalli di 1 minuto, fino a quando **N rimane costante** → il **motore è arrivato a regime**

Raggiungimento regime

t [s]	n [giri/min]
0	69
60	95
120	93
180	99
240	98
300	114
360	110
420	112
480	107
540	118
600	128
660	127
720	123
780	125
840	135
900	134
960	130
1020	129
960	126
1020	126
1080	130
1140	121
1200	130
1260	121



- 📍 Individuare intervallo in cui motore sembra aver raggiunto regime, ovvero intervallo in cui n è stabile
- 📍 Calcolare **media mobile** dei punti (dati $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$, $x_{m3} = (x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5)/5$, $x_{m4} = (x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6)/5$, ...)

Raggiungimento regime

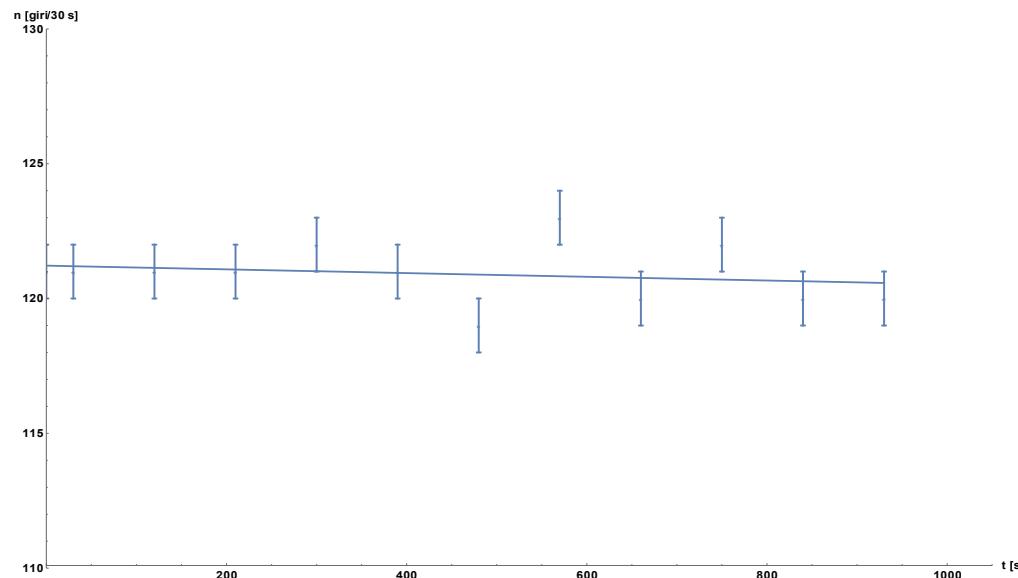
t [s]	n [giri/min]
0	69
60	95
120	93
180	99
240	98
300	114
360	110
420	112
480	107
540	118
600	128
660	127
720	123
780	125
840	135
900	134
960	130
1020	129
960	126
1020	126
1080	130
1140	121
1200	130
1260	121



- 📍 Individuare intervallo in cui motore sembra aver raggiunto regime, ovvero intervallo in cui n è stabile
- 📍 Calcolare **media mobile** dei punti (dati $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$, $x_{m3} = (x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5)/5$, $x_{m4} = (x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6)/5$, ...)

Raggiungimento regime

t [s]	n [giri/min]
0	69
60	95
120	93
180	99
240	98
300	114
360	110
420	112
480	107
540	118
600	128
660	127
720	123
780	125
840	135
900	134
960	130
1020	129
960	126
1020	126
1080	130
1140	121
1200	130
1260	121



- 📌 Individuare intervallo in cui motore sembra aver raggiunto regime, ovvero intervallo in cui n è stabile
- 📌 Calcolare **media mobile** dei punti (dati $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$, $x_{m3} = (x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5) / 5$, $x_{m4} = (x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6) / 5$, ...)
- 📌 Utilizzando i nuovi punti ottenuti eseguire fit lineare e discutere i parametri (coeff. angolare compatibile con 0)

Metodo del freno dinamom.

- Si avvolge sull'asse del volano, nel senso di rotazione del motore, una corda collegata ad una estremità a un dinamometro (l'altra estremità è tenuta ferma con la mano, in modo che la forza applicata a questo estremo sia nulla)



Metodo del freno dinamom.

- Si avvolge sull'asse del volano, nel senso di rotazione del motore, una corda collegata ad una estremità a un dinamometro
- Tirando il dinamometro **si applica alla corda una forza F** di intensità tale da rallentare la frequenza di rotazione del motore (F misurata con dinamometro)

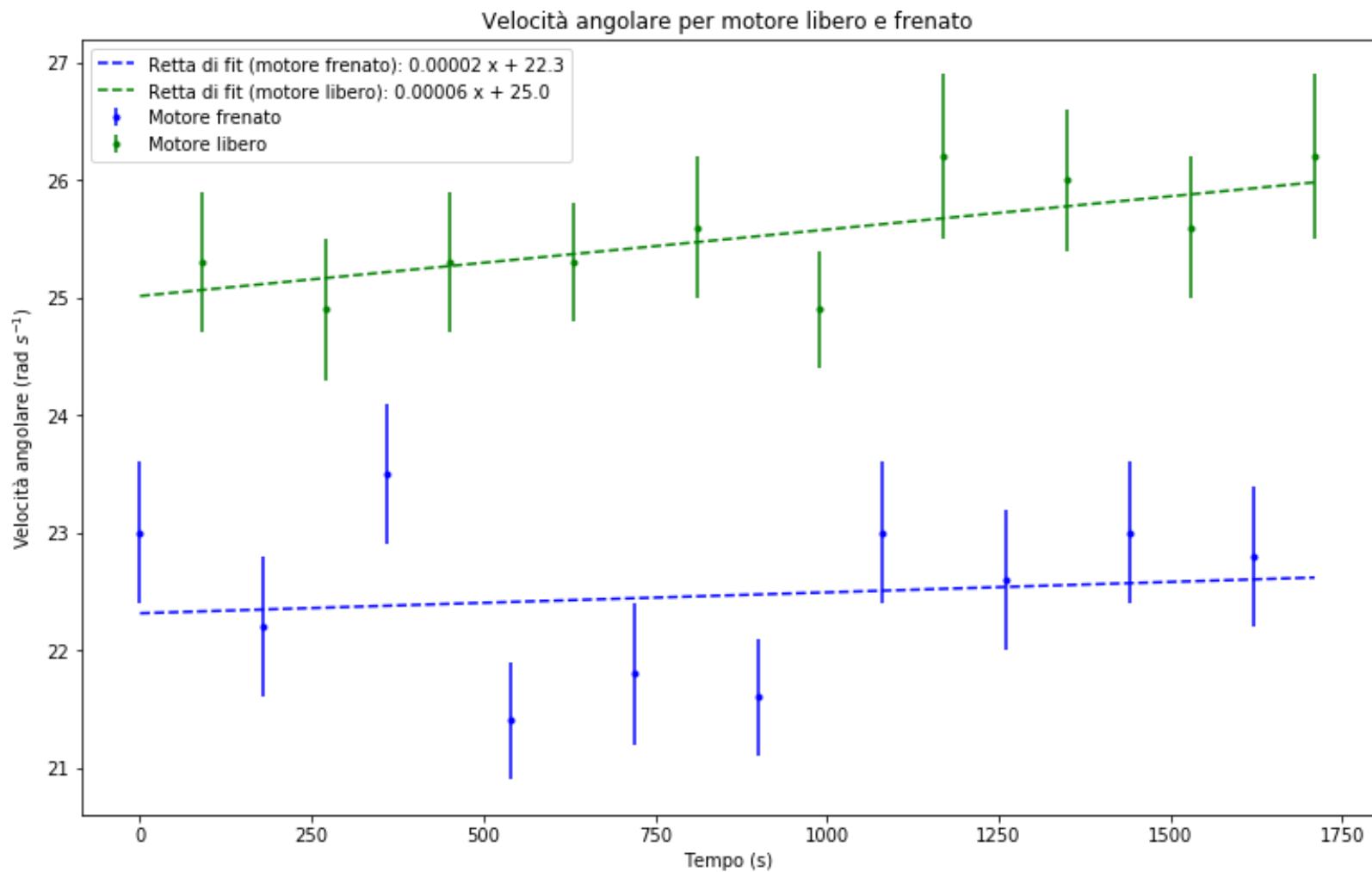


Metodo del freno dinamom.

- Si avvolge sull'asse del volano, nel senso di rotazione del motore, una corda collegata ad una estremità a un dinamometro
- Tirando il dinamometro si applica alla corda una forza F di intensità tale da rallentare la frequenza di rotazione del motore (F misurata con dinamometro)
- Si misura per 1 minuto il numero di giri N' a motore frenato, poi si ripete la misura di N a motore libero e si alternano così le misure per circa 10 volte.



Metodo del freno dinamom.



Metodo del freno dinamom.

- Si parta da $L = \vec{F} \cdot \Delta \vec{s} = F\Delta s$ (con F e Δs //) $\rightarrow P = \frac{F\Delta s}{\Delta t} = F\mathcal{V}$

Metodo del freno dinamom.

- Si parta da $L = \vec{F} \cdot \Delta \vec{s} = F\Delta s$ (con F e $\Delta s //$) $\rightarrow P = \frac{F\Delta s}{\Delta t} = F\mathcal{V}$
- Se moto è rotatorio: $P_{mecc} = M_m\omega$ (nell'esperienza P_{mecc} e M_m incognite)

Metodo del freno dinamom.

- Si parta da $L = \vec{F} \cdot \Delta \vec{s} = F\Delta s$ (con F e $\Delta s //$) $\rightarrow P = \frac{F\Delta s}{\Delta t} = F\mathcal{V}$
- Se moto è rotatorio: $P_{mecc} = M_m\omega$ (nell'esperienza P_{mecc} e M_m incognite)
- Si introduca ora una forza d'attrito per mezzo del freno dinamometrico \rightarrow parte della P_{mecc} iniziale verrà dissipata in P_{diss} e la potenza meccanica $P'_{mecc} < P_{mecc}$ (**conservazione energia**):

$$P_{mecc} = P'_{mecc} + P_{diss}$$

Metodo del freno dinamom.

- Si parta da $L = \vec{F} \cdot \Delta \vec{s} = F\Delta s$ (con F e $\Delta s //$) $\rightarrow P = \frac{F\Delta s}{\Delta t} = F\mathcal{V}$
- Se moto è rotatorio: $P_{mecc} = M_m\omega$ (nell'esperienza P_{mecc} e M_m incognite)
- Si introduca ora una forza d'attrito per mezzo del freno dinamometrico \rightarrow parte della P_{mecc} iniziale verrà dissipata in P_{diss} e la potenza meccanica $P'_{mecc} < P_{mecc}$ (**conservazione energia**):

$$P_{mecc} = P'_{mecc} + P_{diss} \rightarrow M_m\omega = M_m\omega' + F_{fren}\frac{d}{2}\omega'$$

$$M_m(\omega - \omega') = F_{fren}\omega'\frac{d}{2}$$

$$M_m = \frac{F_{fren}\omega'd}{2(\omega - \omega')}$$

Metodo del freno dinamom.

- Si parta da $L = \vec{F} \cdot \Delta \vec{s} = F\Delta s$ (con F e $\Delta s //$) $\rightarrow P = \frac{F\Delta s}{\Delta t} = F\mathcal{V}$
- Se moto è rotatorio: $P_{mecc} = M_m\omega$ (nell'esperienza P_{mecc} e M_m incognite)
- Si introduca ora una forza d'attrito per mezzo del freno dinamometrico \rightarrow parte della P_{mecc} iniziale verrà dissipata P_{diss} e la potenza meccanica $P'_{mecc} < P_{mecc}$ (**conservazione energia**):

$$P_{mecc} = P'_{mecc} + P_{diss} \rightarrow M_m\omega = M_m\omega' + F_{fren}\frac{d}{2}\omega'$$

$$M_m(\omega - \omega') = F_{fren}\omega'\frac{d}{2}$$

$$M_m = \frac{F_{fren}\omega'd}{2(\omega - \omega')} \Rightarrow P_{mecc} = \frac{F_{fren}\omega\omega'd}{2(\omega - \omega')}$$

Metodo del freno dinamom.

- Si calcola la **POTENZA MECCANICA** secondo la relazione:

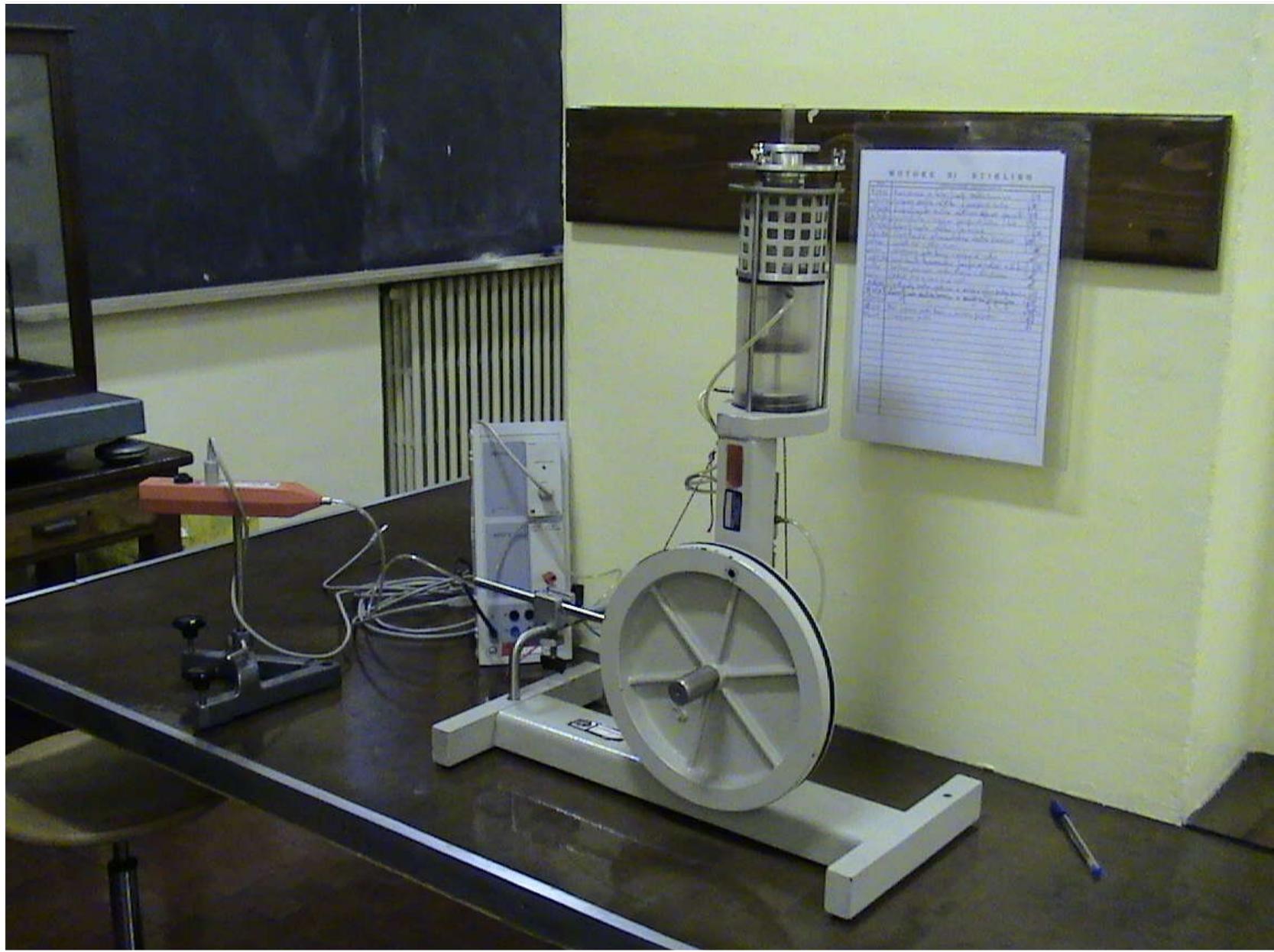
$$P_{mecc} = \frac{F_{fren}\omega\omega'd}{2(\omega - \omega')}$$

con

- ω ricavato da numero di giri del motore a regime
 - ω' ricavato da numero di giri del motore frenato da una forza F_{fren}
 - F_{fren} forza frenante
 - d diametro dell'albero motore
-
- Si ricava quindi il rendimento η (e relativo errore): $\eta = P_{mecc}/P_e$
con $P_e = V \cdot i$, potenza elettrica fornita

SECONDA PARTE

Misura del rendimento col
metodo dell'area del ciclo



Misura del rendimento col metodo dell'area del ciclo

- Un sensore di pressione fornisce la **p dell'aria** all'interno del cilindro in funzione del tempo.
- Un sensore di spostamento misura lo spostamento del pistone in funzione del tempo, e da questo, nota la sezione del motore, si misura il **volume**.
- Si misura il **numero di giri al secondo** n del volano e si calcola l'**area del ciclo** L_c . La potenza fornita dal motore è: $P_M = L_c * n$
- Il **rapporto** tra la potenza P_M e la potenza elettrica fornita dal filamento P_E fornisce il **rendimento**.

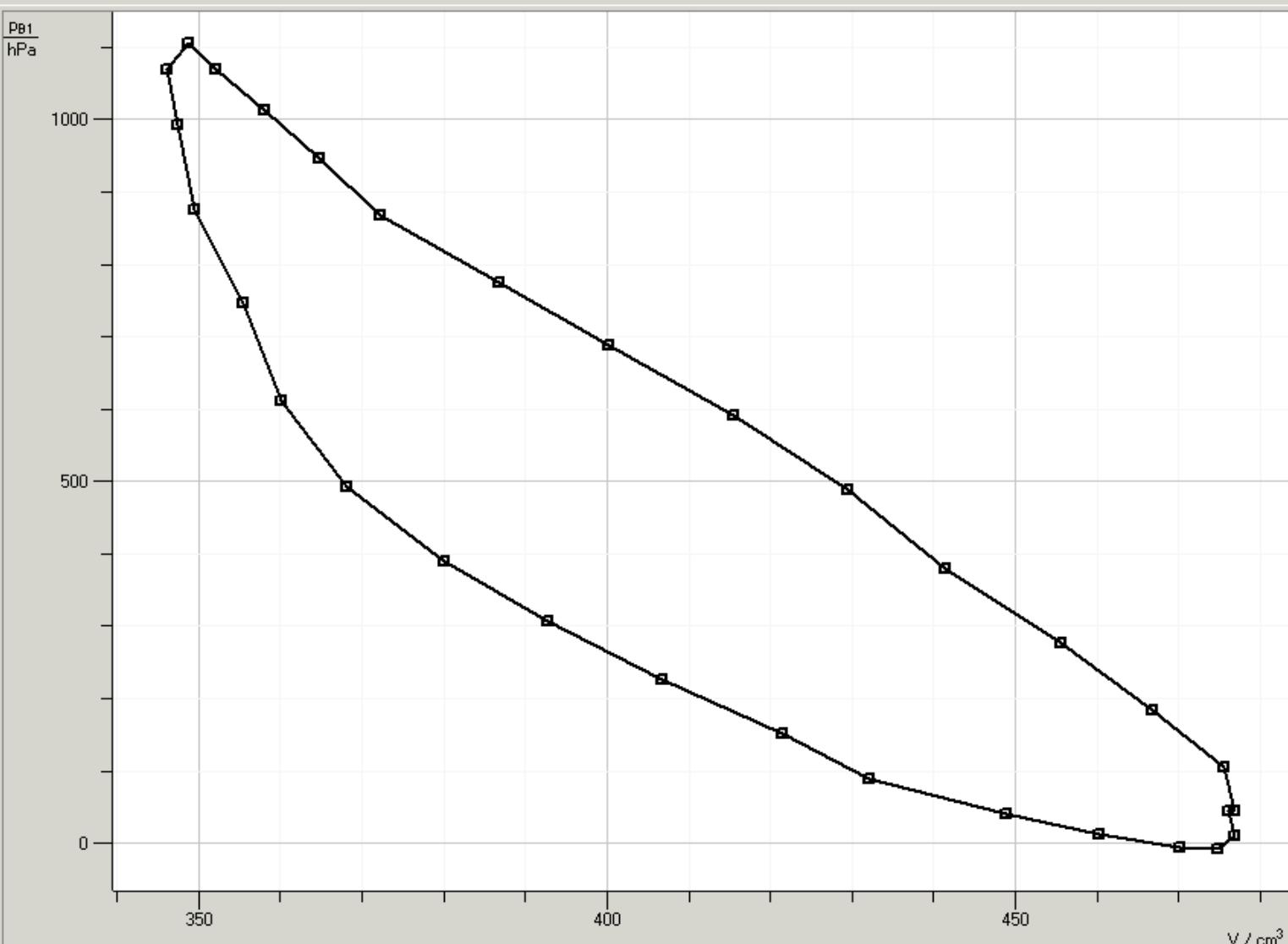


SA1 pb1 V V'

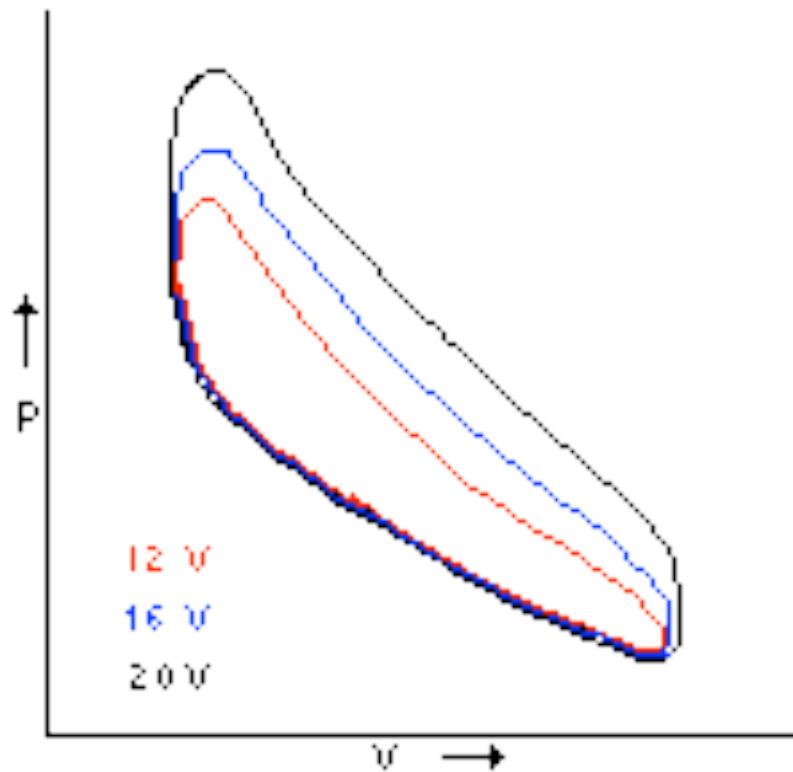
Standard Frequenzspektrum

V / cm³ pb1 / hPa

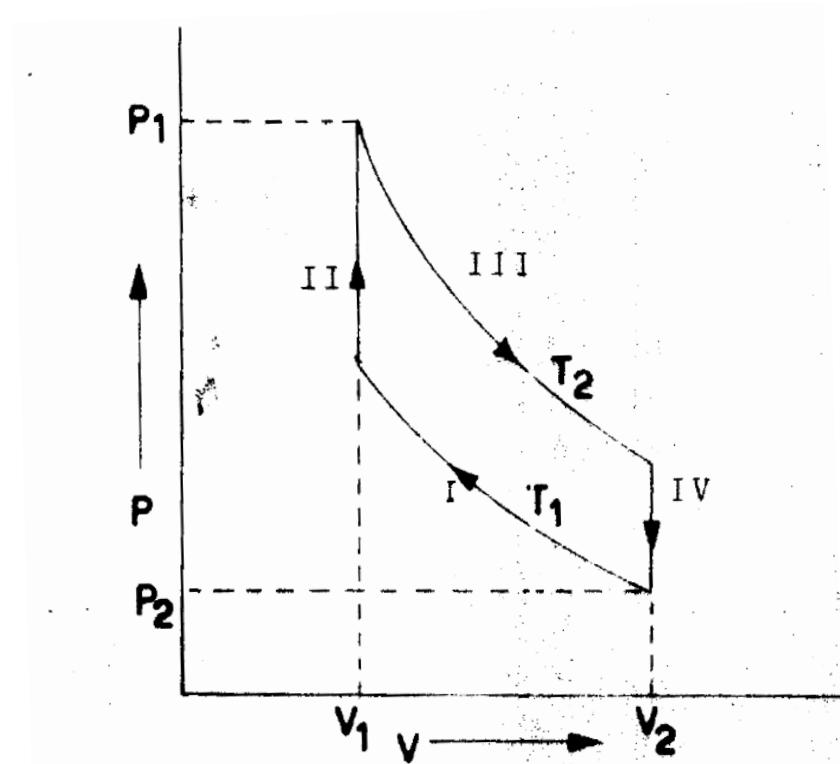
476,2	45
476,8	10
474,8	-7
470,2	-5
460,2	12
448,8	40
432,1	90
421,5	151
406,8	227
392,8	307
380,1	390
368,1	492
360,1	612
355,5	746
349,5	876
347,4	992
346,1	1069
348,8	1105
352,1	1069
358,1	1013
364,8	946
372,1	867
386,8	774
400,1	688
415,5	591
429,5	488
441,5	379
455,5	276
466,8	183
475,5	105
476,8	45



Confronto ciclo reale/ideale



Ciclo reale



Ciclo ideale

TERZA PARTE

Misura dell'efficienza della
macchina frigorifera /
pompa di calore

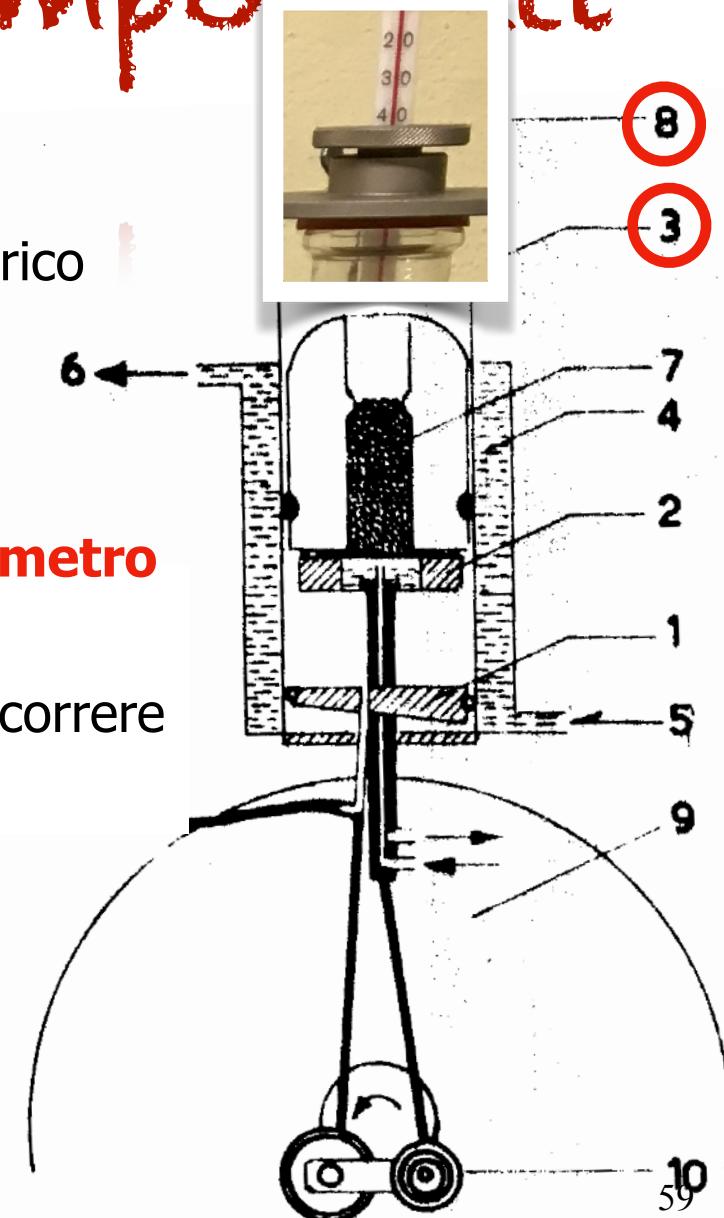
Schema dei componenti

[1] **Pistone di lavoro** e [2] **pistone di spostamento** (forato), collegati ad un eccentrico [10], impenniato sul volano [9], in modo tale che il loro movimento sia sfasato di 90°

[3] Parte superiore del cilindro, con [8] **termometro**

[4] **Camicia di raffreddamento** in cui si fa scorrere l'acqua mediante tubicini connessi agli attacchi [5 e 6]

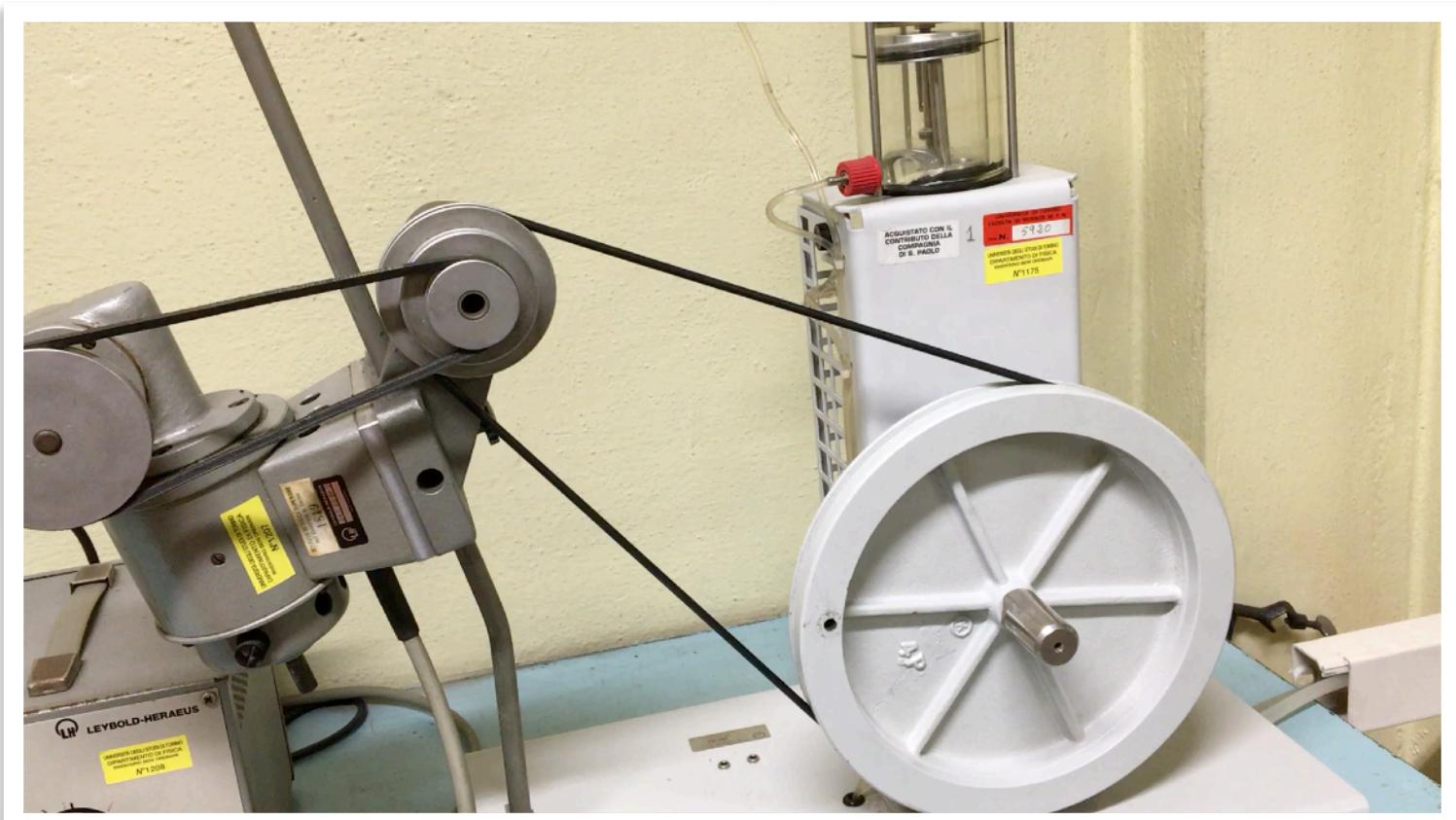
[7] **Lana di rame** = rigeneratore o scambiatore termico





Macchina frigorifera o pompa di calore

- L'energia meccanica viene fornita dall'esterno: il volano gira sotto l'azione di un motore elettrico



Macchina frigorifera o pompa di calore

- L'**energia meccanica** viene **fornita dall'esterno**: il volano gira sotto l'azione di un motore elettrico
- La macchina produce un trasferimento di Q che porta ad una variazione ΔT del gas:
 - macchina assorbe Q dall'aria che si trova nella parte superiore del cilindro, cedendolo all'acqua nell'intercapedine
→ **macchina frigorifera** (rotazione in senso orario)
 - macchina assorbe Q dall'acqua trasferendolo all'aria, che si riscalda
→ **pompa di calore** (rotazione in senso anti-orario)

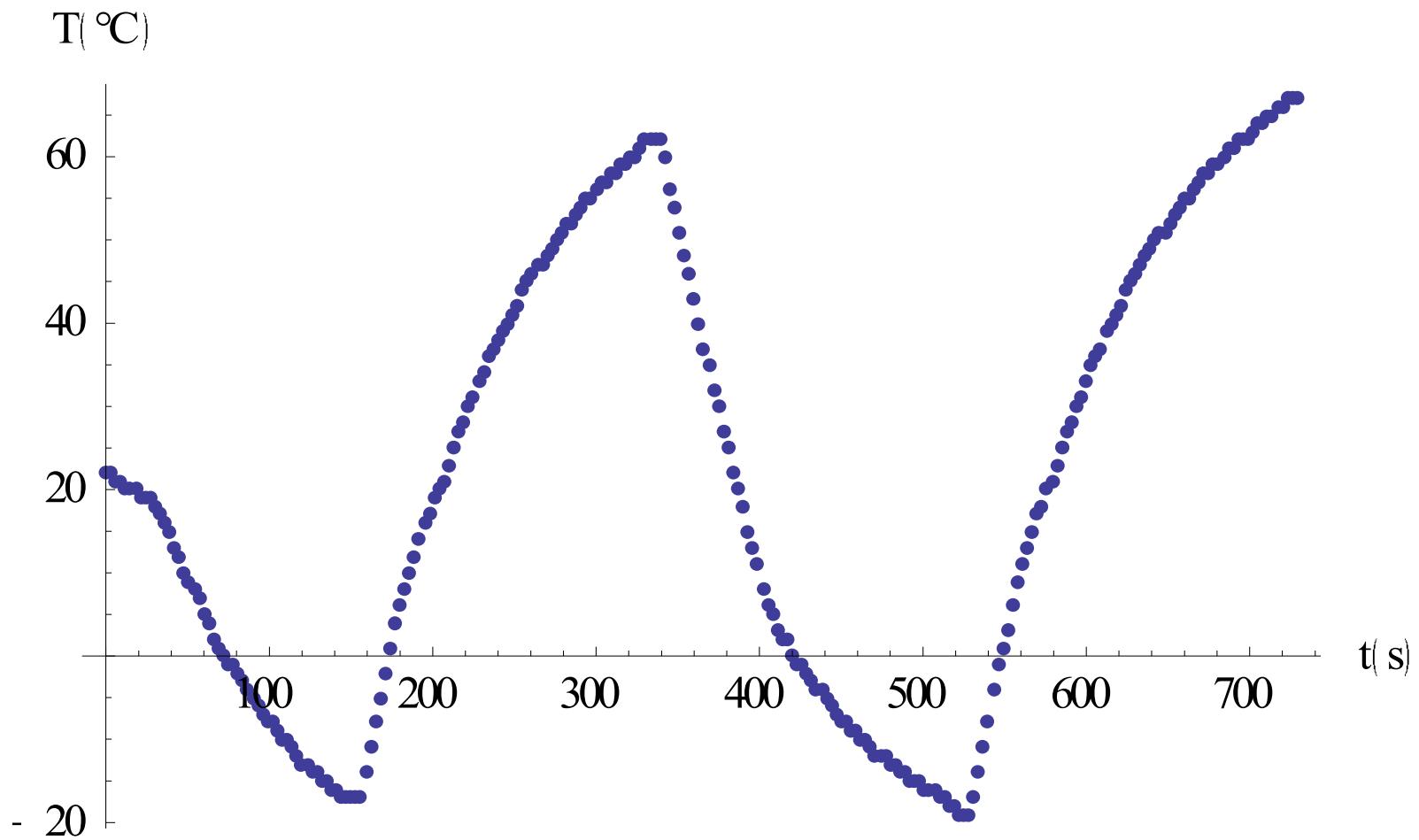
Macchina frigorifera o pompa di calore

- L'**energia meccanica** viene **fornita dall'esterno**: il volano gira sotto l'azione di un motore elettrico
- La macchina produce un trasferimento di Q che porta ad una variazione ΔT del gas:
 - ⌚ macchina assorbe Q dall'aria che si trova nella parte superiore del cilindro, cedendolo all'acqua nell'intercapedine
→ **macchina frigorifera** (rotazione in senso orario)
 - ⌚ macchina assorbe Q dall'acqua trasferendolo all'aria, che si riscalda
→ **pompa di calore** (rotazione in senso anti-orario)
- Lo **scambio di calore Q** è proporzionale a **ΔT** (T monitorata con un termometro)

Macchina frigorifera o pompa di calore

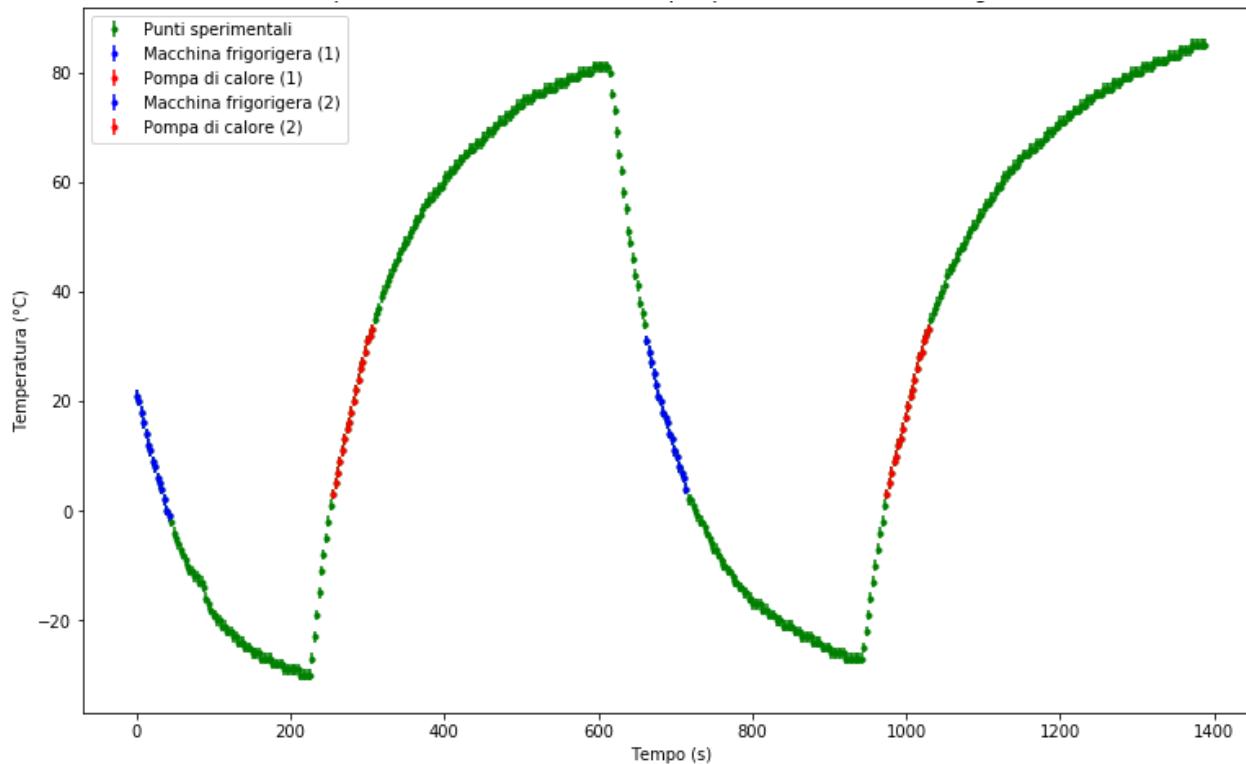


I dati sperimentali



I dati sperimentali

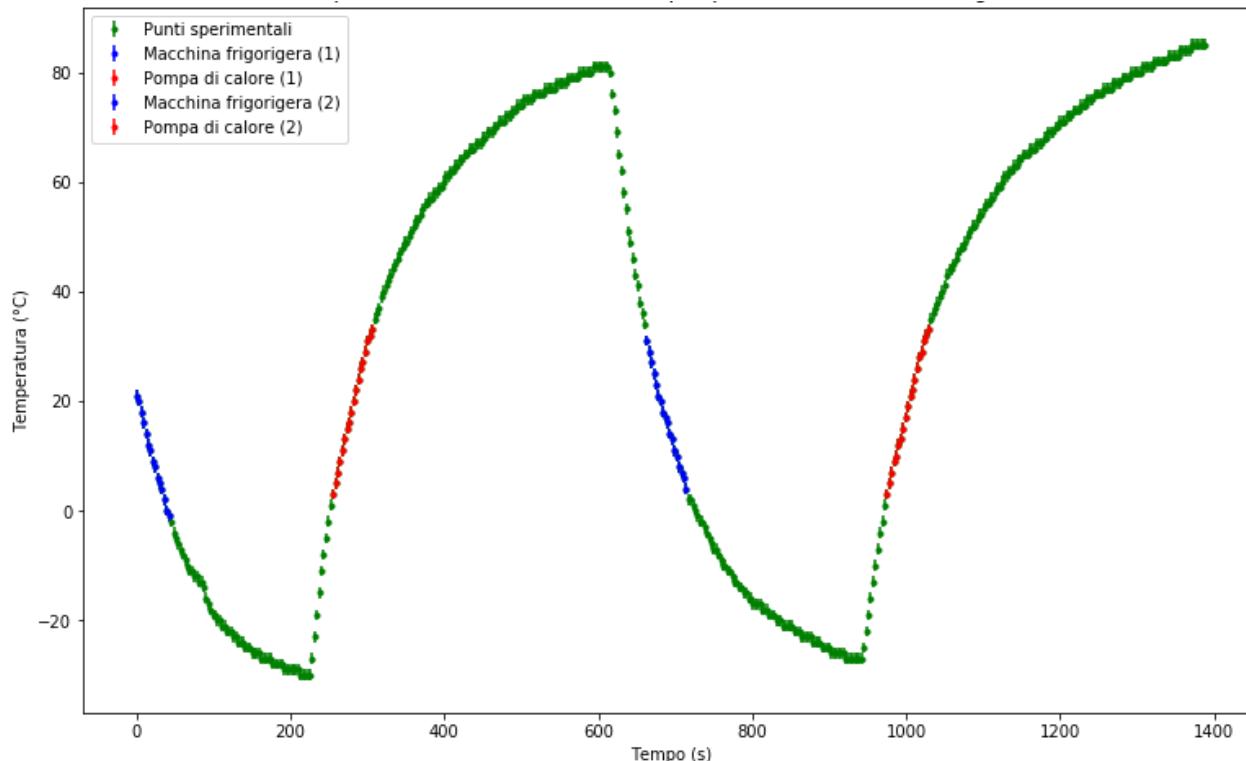
- Nella serie di dati $T(t)$ si possono identificare **3 zone**:
 - $T \ll T_{amb}$
 - $T \sim T_{amb}$
 - $T \gg T_{amb}$



I dati sperimentali

• Nella serie di dati $T(t)$ si possono identificare **3 zone**:

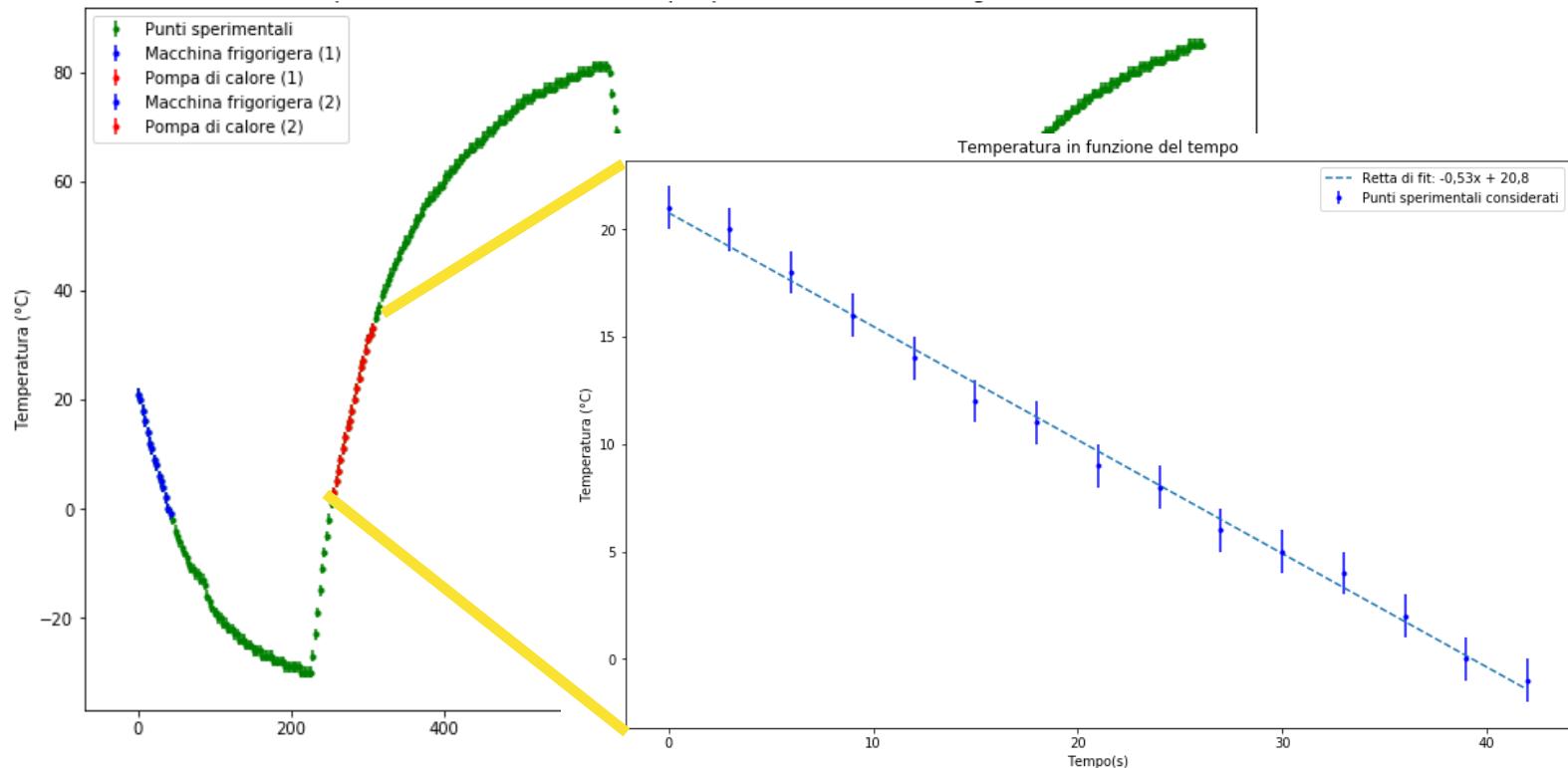
- $T \ll T_{amb}$
- $T \sim T_{amb} \rightarrow$ zona più adiabatica, da individuare sul grafico
- $T \gg T_{amb}$



I dati sperimentali

• Nella serie di dati $T(t)$ si possono identificare **3 zone**:

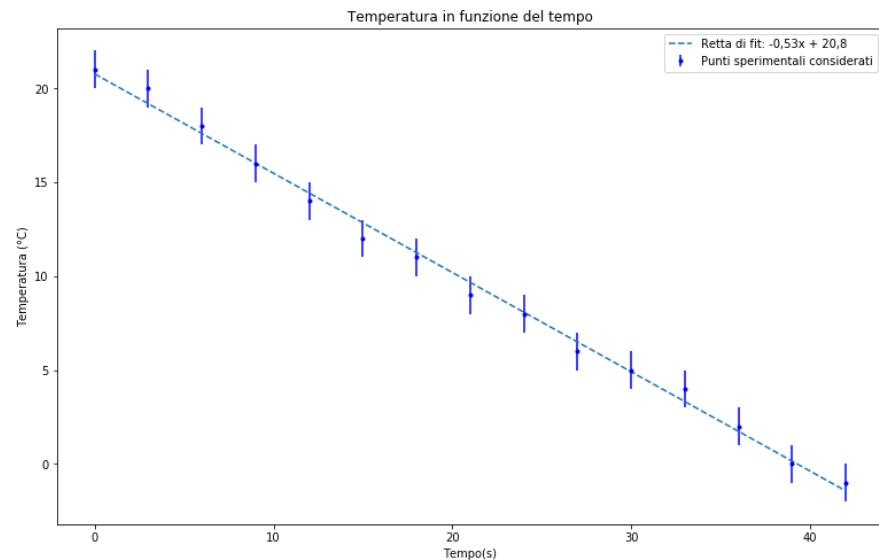
- $T \ll T_{amb}$
- $T \sim T_{amb} \rightarrow$ zona più adiabatica, da individuare sul grafico
- $T \gg T_{amb}$



I dati sperimentali

- Identificare le zone in cui il sistema ha minori interazioni con l'ambiente esterno $\rightarrow \Delta T \propto \Delta t$

- La diminuzione di ΔT ottenuta in un certo intervallo di Δt è proporzionale al Q estratto all'aria: $\Delta T / \Delta t \propto Q / \Delta t$



- Studiare $Q/\Delta t$ permette di valutare **l'efficienza** della macchina, cioè il **rapporto fra Q ottenuto e L meccanico fornito**

I dati sperimentali

- Si può verificare la relazione lineare fra T e t con il **coeff. di correlazione lineare**, considerando $+/- \sim 10^\circ$ intorno a T_{amb}
- Si può stimare la rapidità di scambio di Q , che è proporzionale alla rapidità di variazione di T , attraverso il coefficiente angolare della retta di best fit
- A parità di energia meccanica fornita, questo permette di confrontare l'efficienza dell'apparato **come macchina frigorifera e come pompa di calore**