



**POLITECNICO**  
MILANO 1863

# Lezione 05 - Macchine termodinamiche

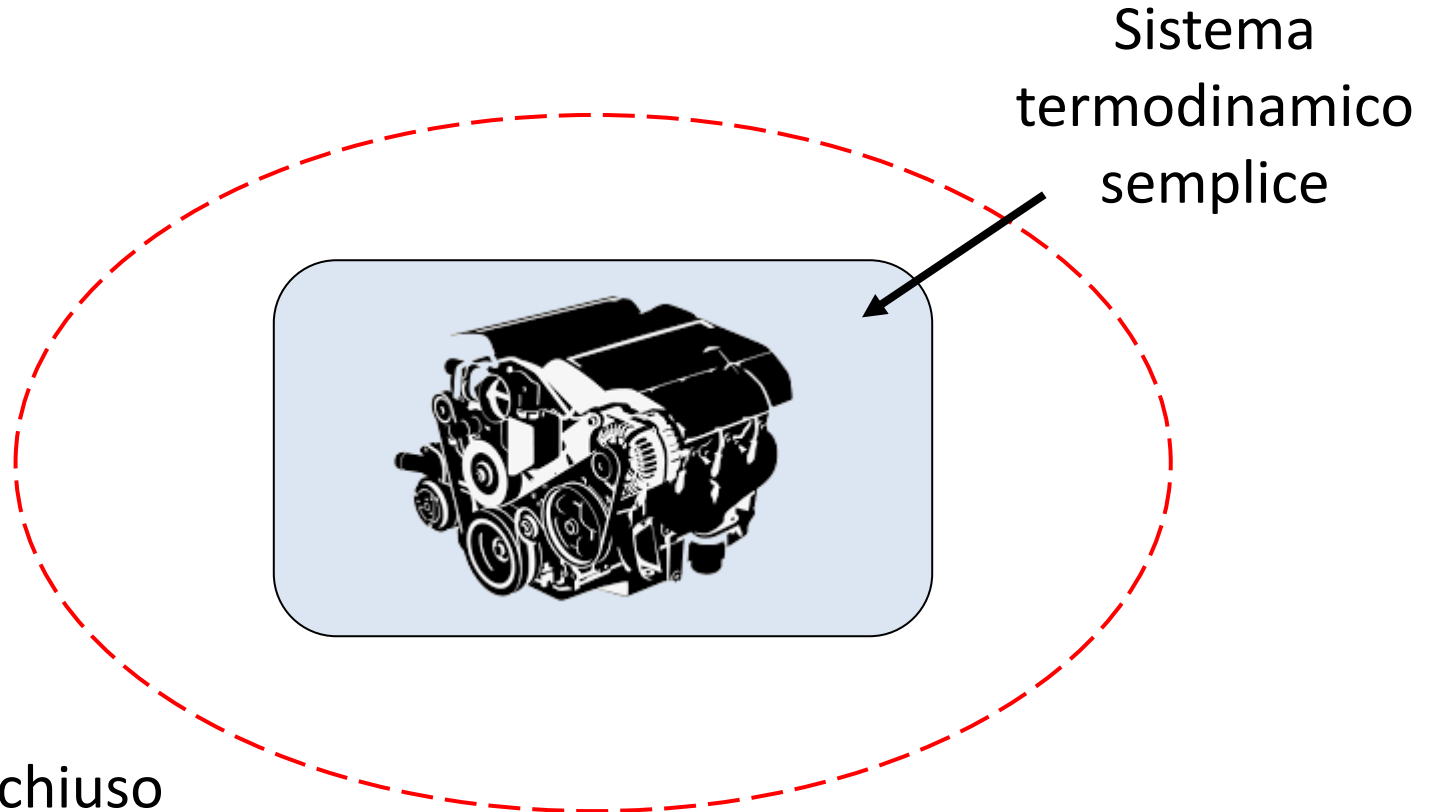
**Corso di Fisica Tecnica**  
**a.a. 2019-2020**

***Prof. Gaël R. Guédon***  
Dipartimento di Energia, Politecnico di Milano

## Obiettivi della lezione

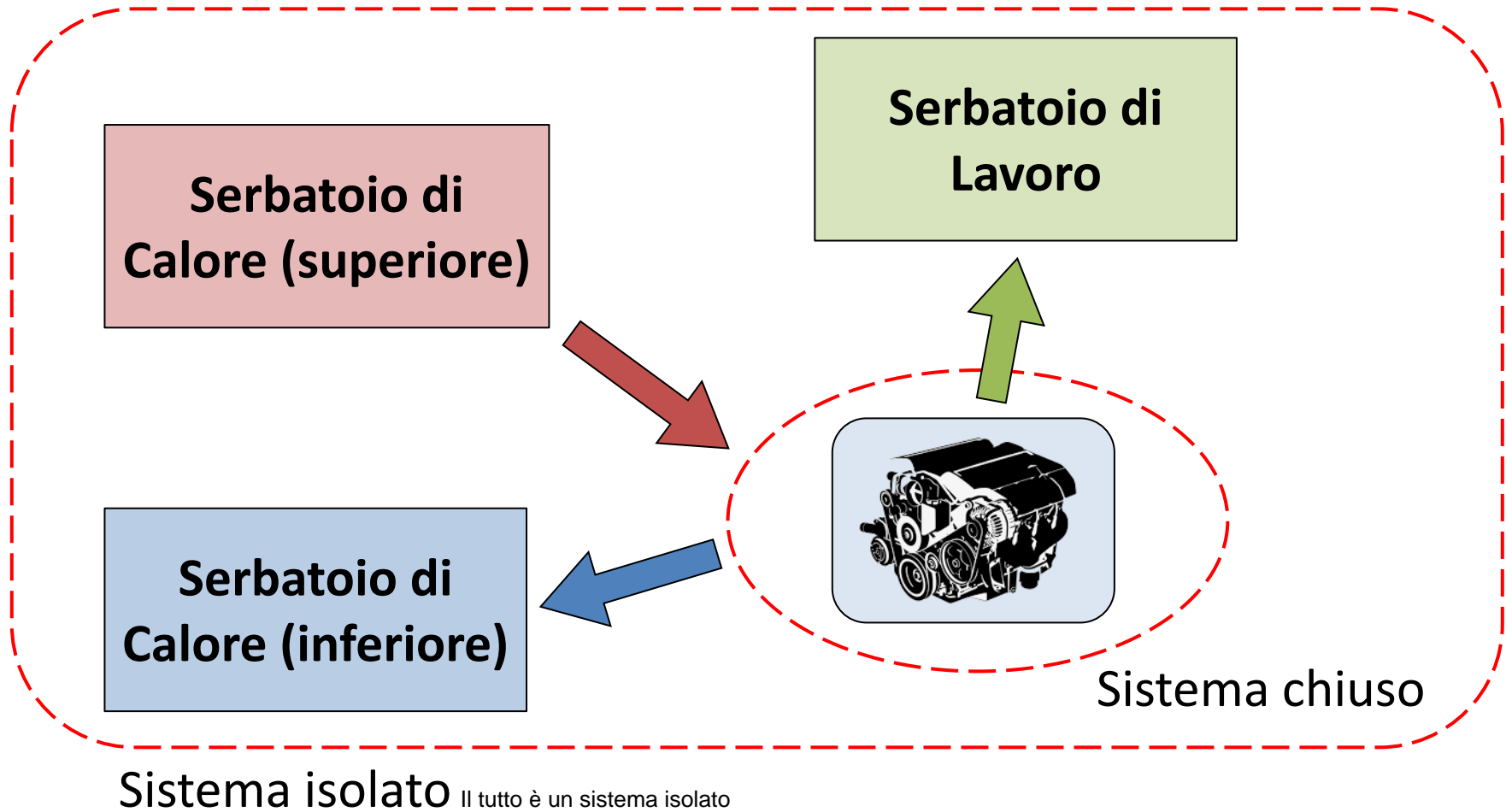
- Definire una **macchina termodinamica**
- Definire il **serbatoio di calore** e il **serbatoio di lavoro**
- Ricavare le equazioni di bilancio per la **macchina motrice** e la **macchina operatrice**
- Ricavare il **rendimento** della macchina **motrice** e l'**efficienza** della macchina operatrice (**frigorifera** e **pompa di calore**)
- Definire il **rendimento di secondo principio**

## La macchina termodinamica



Una prima semplificazione che facciamo per rappresentare macchine reali è che le consideriamo sistemi chiusi

Oltre al sottosistema che rappresenta il nostro motore, andiamo a considerare altri tre sottosistemi che chiamiamo serbatoi



**La macchina termodinamica** è un sistema termodinamico composto ed isolato che, nella sua forma più semplice, è realizzato da:

- due serbatoi di calore (superiore e inferiore)
- un serbatoio di lavoro
- una macchina ciclica

che è in grado di produrre od assorbire con continuità lavoro interagendo con il serbatoio di lavoro ed i serbatoi di calore



**Sistema termodinamico** che scambia **solo calore** con l'esterno senza alterare il suo stato termodinamico; gli scambi avvengono con trasformazioni quasi-statiche (**internamente reversibili**)

cioè temperatura del serbatoio rimane costante, pressione del serbatoio rimane costante, tutto quello che è dentro al serbatoio rimane costante, il suo stato non cambia.

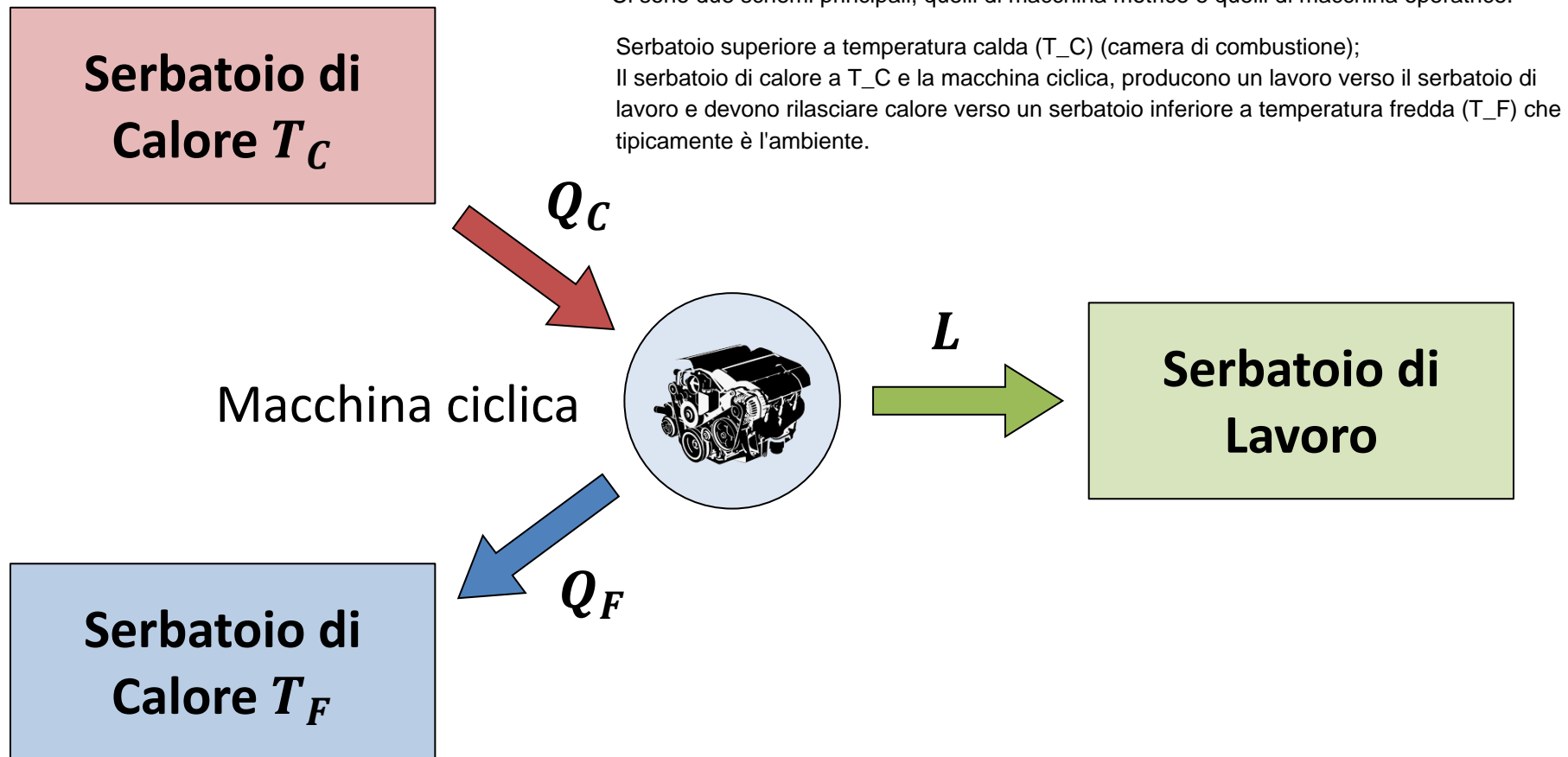
Questa definizione di serbatoio è sinonimo di un sistema a massa infinita (per esempio l'atmosfera terrestre). Se la massa di un sistema A è enormemente maggiore della massa del sistema B, durante un interazione fra A e B, A sembrerà rimanere invariata, poichè tutte le trasformazioni e tutte le grandezze sono legate alla massa.

Il tipico esempio di serbatoio di lavoro è la rete elettrica

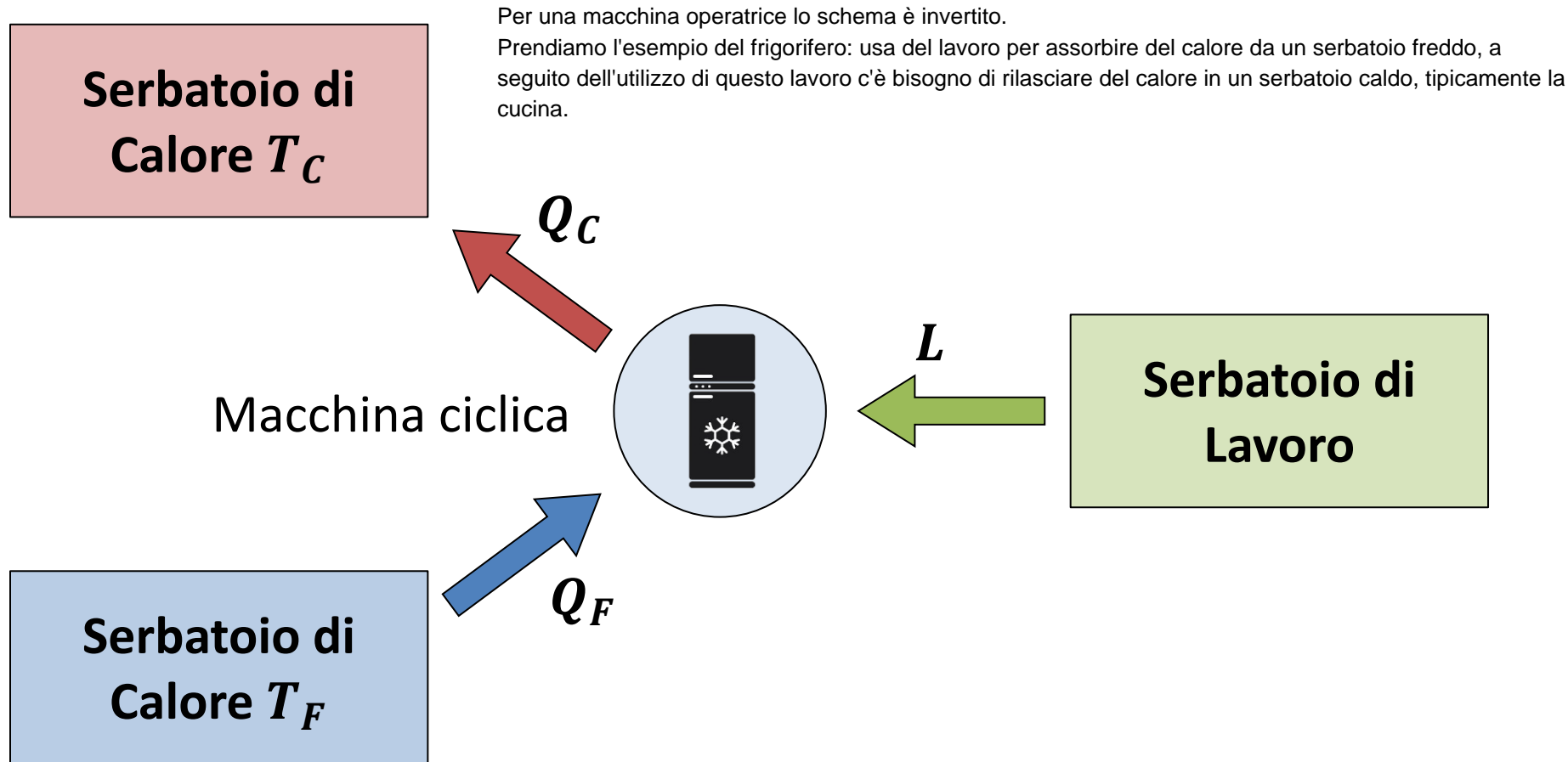


**Sistema termodinamico** che scambia **solo lavoro** con l'esterno senza alterare il suo stato termodinamico; gli scambi avvengono con trasformazioni quasi-statiche (**internamente reversibili**)

Per macchina ciclica si intendono macchine che compiono azioni che hanno stato finale e stato iniziale identici, e ripetono  $n$  volte questo ciclo.

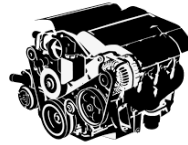






Vediamo la macchina motrice dal punto di vista analitico.

Dalle equazioni di bilancio:



$$\begin{cases} \Delta U_Z = 0 \\ \Delta S_Z = S_{irr} \end{cases} \quad \begin{cases} \Delta U_C + \Delta U_F + \Delta U_{SL} + \Delta U_M = 0 \\ \Delta S_C + \Delta S_F + \Delta S_{SL} + \Delta S_M = S_{irr} \end{cases} \quad \begin{matrix} (=0 \text{ perchè il sistema composto è} \\ \text{isolato}) \end{matrix}$$

Ma essendo...

serbatoio di calore superiore

$$\begin{cases} \Delta U_C = Q_C^{\leftarrow} \\ \Delta S_C = \frac{Q_C^{\leftarrow}}{T_C} \end{cases}$$

serbatoio di calore inferiore

$$\begin{cases} \Delta U_F = Q_F^{\leftarrow} \\ \Delta S_F = \frac{Q_F^{\leftarrow}}{T_F} \end{cases}$$

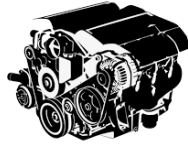
serbatoio di lavoro

$$\begin{cases} \Delta U_{SL} = -L_{SL}^{\rightarrow} \\ \Delta S_{SL} = 0 \end{cases}$$

macchina motrice

$$\begin{cases} \Delta U_M = 0 \\ \Delta S_M = 0 \end{cases}$$

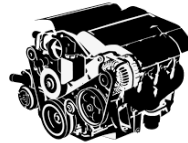
...ne deriva...



$$\begin{cases} Q_C^{\leftarrow} + Q_F^{\leftarrow} - L_{SL}^{\rightarrow} = 0 \\ \frac{Q_C^{\leftarrow}}{T_C} + \frac{Q_F^{\leftarrow}}{T_F} = S_{irr} \end{cases}$$

$$\begin{cases} -Q_C + Q_F + L = 0 \\ -\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} = S_{irr} \end{cases}$$

$$\begin{cases} Q_F = Q_C - L \\ L = Q_C \left( 1 - \frac{T_F}{T_C} \right) - T_F S_{irr} \end{cases}$$



Essendo  $T_C > T_F$  e  $L > 0$  il lavoro è massimo quando il processo è reversibile.

## Rendimento

$$\eta = \frac{\text{EFFETTO UTILE}}{\text{SPESA}}$$

La cosa più importante da tenere a mente è questa definizione del rendimento.

es. per un'automobile, l'effetto utile è il potersi muovere, la spesa è il combustibile.

Formule dei rendimenti:

$$\eta = \frac{L}{Q_C} = 1 - \frac{T_F}{T_C} - \frac{T_F}{Q_C} S_{irr} \qquad \eta_{rev} = 1 - \frac{T_F}{T_C}$$

## Valido per serbatoi di calore a temperatura costante!!!!

Le formule che vediamo qua sopra sono valide solo per serbatoi a temp costante, nel momento in cui questo viene a mancare, non possiamo più usarle, ma invece possiamo usare la definizione di rendimento (riquadro grigio)

Dalle equazioni di bilancio:

$$\begin{cases} \Delta U_Z = 0 \\ \Delta S_Z = S_{irr} \end{cases} \quad \begin{cases} \Delta U_C + \Delta U_F + \Delta U_{SL} + \Delta U_M = 0 \\ \Delta S_C + \Delta S_F + \Delta S_{SL} + \Delta S_M = S_{irr} \end{cases}$$



Ma essendo...

$$\begin{cases} \Delta U_C = Q_C^{\leftarrow} \\ \Delta S_C = \frac{Q_C^{\leftarrow}}{T_C} \end{cases} \quad \begin{cases} \Delta U_F = Q_F^{\leftarrow} \\ \Delta S_F = \frac{Q_F^{\leftarrow}}{T_F} \end{cases} \quad \begin{cases} \Delta U_{SL} = -L_{SL}^{\rightarrow} \\ \Delta S_{SL} = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} \Delta U_M = 0 \\ \Delta S_M = 0 \end{cases}$$

...ne deriva...

$$\begin{cases} Q_C^{\leftarrow} + Q_F^{\leftarrow} - L_{SL}^{\rightarrow} = 0 \\ \frac{Q_C^{\leftarrow}}{T_C} + \frac{Q_F^{\leftarrow}}{T_F} = S_{irr} \end{cases}$$

$$\begin{cases} Q_C - Q_F - L = 0 \\ \frac{Q_C}{T_C} - \frac{Q_F}{T_F} = S_{irr} \end{cases}$$



$$\begin{cases} Q_F = Q_C - L \\ L = Q_C \left( 1 - \frac{T_F}{T_C} \right) + T_F S_{irr} \end{cases} \quad \begin{cases} Q_F = Q_C - L \leftarrow \\ L = Q_C \left( 1 - \frac{T_F}{T_C} \right) + T_F S_{irr} \\ L = Q_F \left( \frac{T_C}{T_F} - 1 \right) + T_C S_{irr} \end{cases}$$



Essendo  $T_C > T_F$  e  $L > 0$  il lavoro è minimo quando il processo è reversibile.

**Efficienza o COP**

$$\epsilon = \frac{\text{EFFETTO UTILE}}{\text{SPESA}}$$

$$\epsilon_F = \frac{Q_F}{L} = \frac{T_F}{T_C - T_F + \frac{T_C T_F S_{irr}}{Q_F}}$$

Macchina Frigorifero

$$\epsilon_P = \frac{Q_C}{L} = \frac{T_C}{T_C - T_F + \frac{T_C T_F S_{irr}}{Q_C}}$$

Pompa di calore

$$\epsilon_{F,rev} = \frac{T_F}{T_C - T_F}$$

$$\epsilon_{P,rev} = \frac{T_C}{T_C - T_F}$$

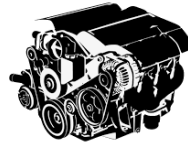


**Valido per serbatoi di calore a temperatura costante**

$$\epsilon_P = \frac{Q_C}{L} = \frac{Q_F + L}{L} = \epsilon_F + 1$$



## Macchina Motrice con serbatoio caldo a massa finita contenente liquido incompressibile perfetto.



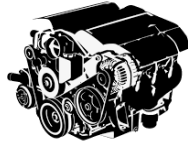
Dalle equazioni di bilancio

$$\begin{cases} \Delta U_Z = 0 \\ \Delta S_Z = S_{irr} \end{cases} \quad \begin{cases} \Delta U_C + \Delta U_F + \Delta U_{SL} + \Delta U_M = 0 \\ \Delta S_C + \Delta S_F + \Delta S_{SL} + \Delta S_M = S_{irr} \end{cases}$$

$$T_1 > T_2$$

$$\begin{cases} \Delta U_{C,12} = Mc(T_2 - T_1) \\ \Delta S_{C,12} = Mc \ln \frac{T_2}{T_1} \end{cases} \quad \begin{cases} \Delta U_F = Q_F^{\leftarrow} \\ \Delta S_F = \frac{Q_F^{\leftarrow}}{T_F} \end{cases} \quad \begin{cases} \Delta U_{SL} = -L_{SL}^{\rightarrow} \\ \Delta S_{SL} = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} \Delta U_M = 0 \\ \Delta S_M = 0 \end{cases}$$

## Macchina Motrice con serbatoio caldo a massa finita contenente liquido incompressibile perfetto.

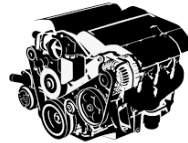


...ne deriva...

$$\begin{cases} Mc(T_2 - T_1) + Q_F^{\leftarrow} - L_{SL}^{\rightarrow} = 0 \\ Mc \ln \frac{T_2}{T_1} + \frac{Q_F^{\leftarrow}}{T_F} = S_{irr} \end{cases}$$

$$\begin{cases} Mc(T_2 - T_1) + Q_F + L = 0 \\ Mc \ln \frac{T_2}{T_1} + \frac{Q_F}{T_F} = S_{irr} \end{cases}$$

## Macchina Motrice con serbatoio caldo a massa finita contenente liquido incompressibile perfetto.



Caso reversibile:  $S_{irr} = 0$

$$Q_C^{\leftarrow} = Mc(T_2 - T_1) \quad \text{Negativo uscente}$$

$$Q_C = Mc(T_1 - T_2) \quad \text{Valore assoluto}$$

$$Q_c = Q_c^{\rightarrow}$$

$$Q_F^{\leftarrow} = -McT_F \ln \frac{T_2}{T_1} = McT_F \ln \frac{T_1}{T_2}$$

Positivo entrante

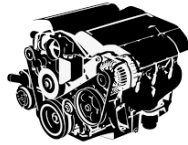
$$Q_F = McT_F \ln \frac{T_1}{T_2}$$

Valore assoluto

$\hookrightarrow Q_{F,REV}$

$$S_e \quad S_{irr} = 0$$

## Macchina Motrice con serbatoio caldo a massa finita contenente liquido incompressibile perfetto.



Caso reversibile:  $S_{irr} = 0$

$$L^{\rightarrow} = Q_C^{\leftarrow} + Q_F^{\leftarrow} = Mc(T_2 - T_1) + McT_F \ln \frac{T_1}{T_2} \quad \text{Negativo entrante}$$

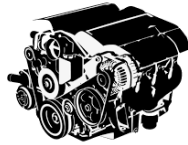
$$L = Q_C - Q_F = Mc(T_1 - T_2) - McT_F \ln \frac{T_1}{T_2} \quad \text{Valore assoluto}$$

$\downarrow$   
 $Q_{F,REV}$

Rendimento

$$\eta = \frac{L}{Q_C} \qquad \eta_{rev} = \frac{L_{rev}}{Q_C}$$

## Rendimento di II principio per la macchina motrice



$$\eta_{II} = \frac{\eta}{\eta_{rev}} = \frac{L}{L_{rev}}$$

## Rendimento di II principio per la macchina operatrice



$$\eta_{II} = \frac{\epsilon}{\epsilon_{rev}} = \frac{L_{rev}}{L}$$