Lezione 05 - Macchine termodinamiche

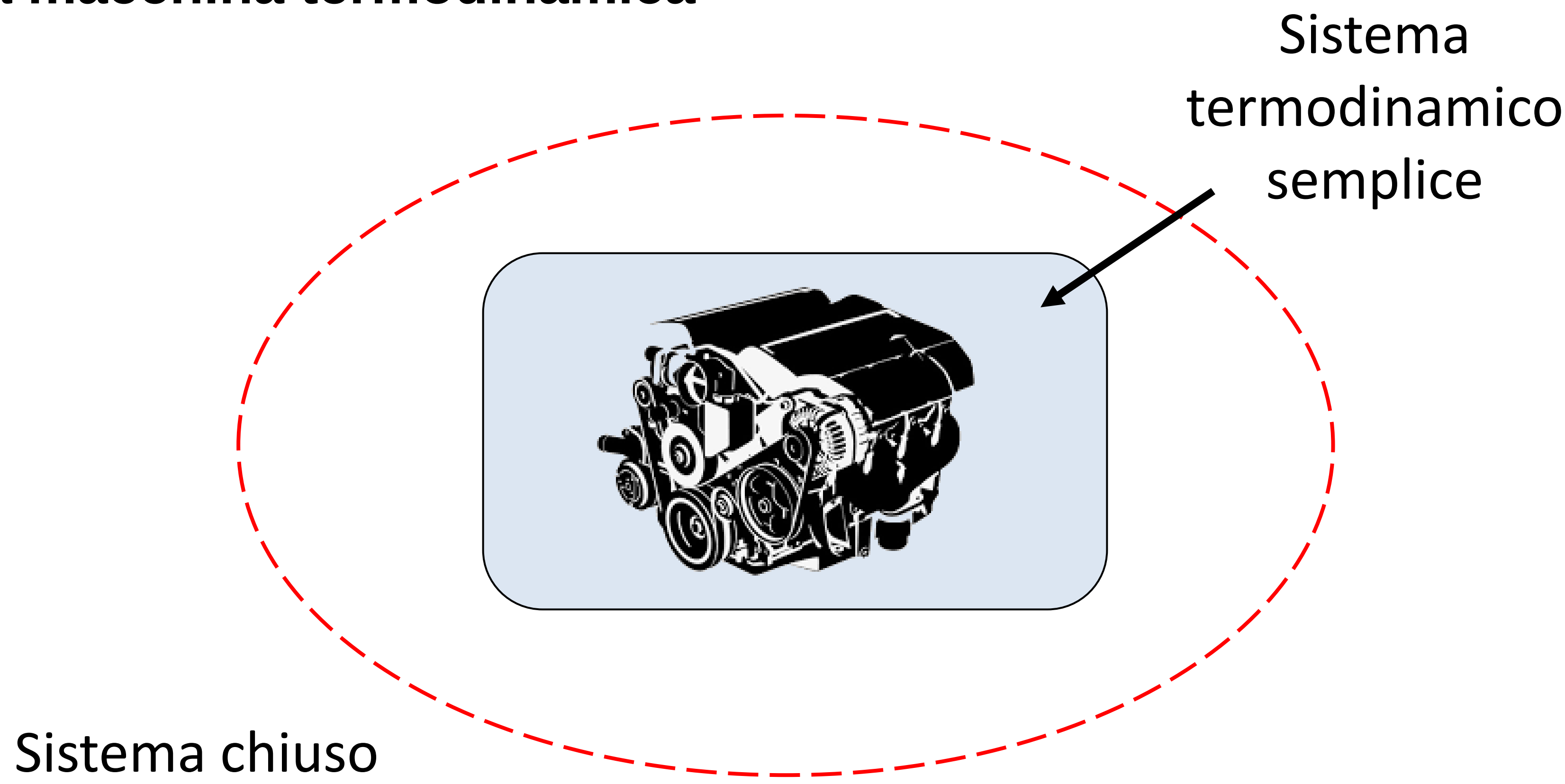
Corso di Fisica Tecnica
a.a. 2019-2020

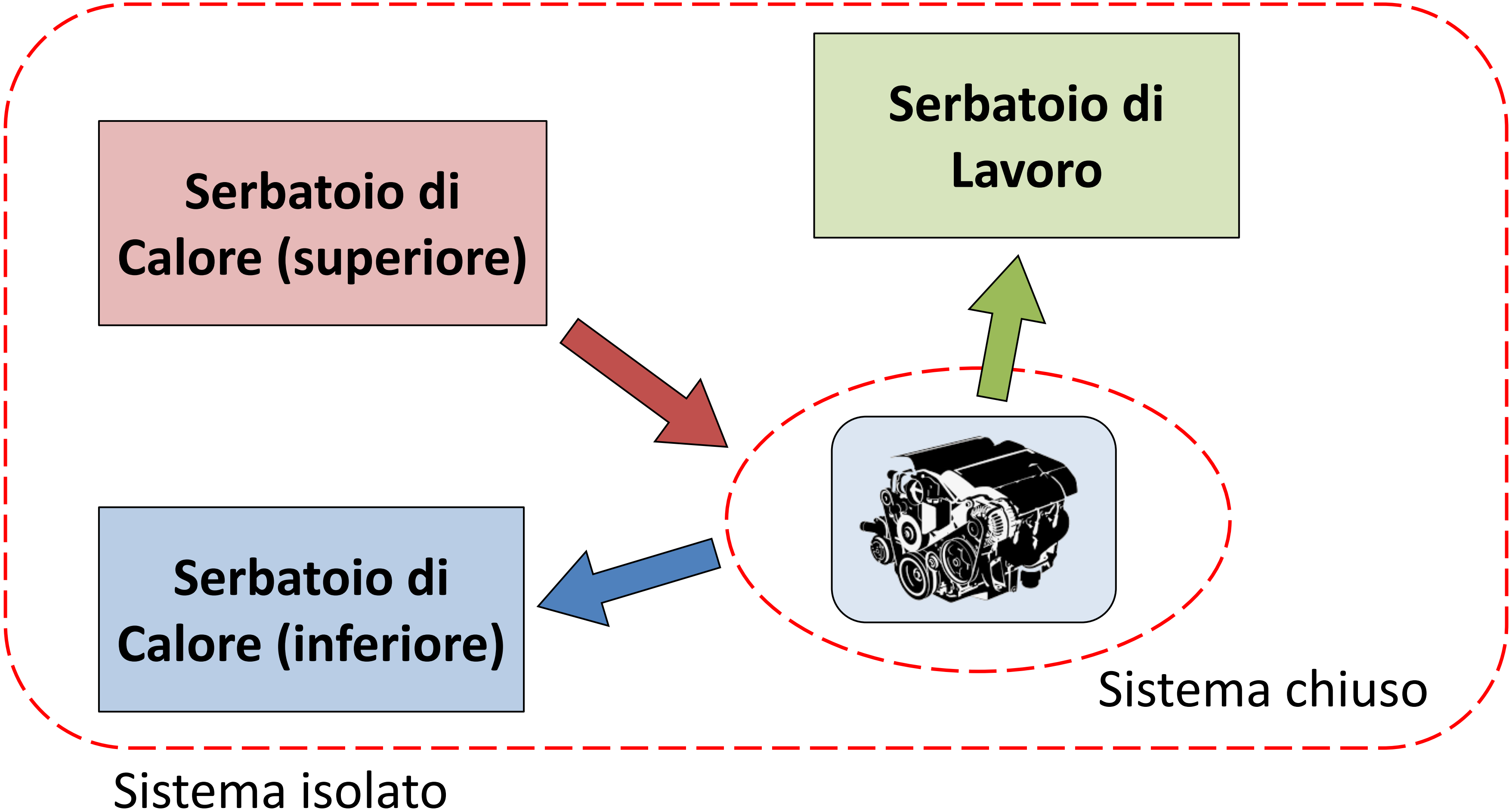
Prof. Gaël R. Guédon
Dipartimento di Energia, Politecnico di Milano

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




Serbatoio di Calore (superiore)
Serbatoio di Lavoro
Serbatoio di Calore (inferiore)
Sistema chiuso
Sistema isolato

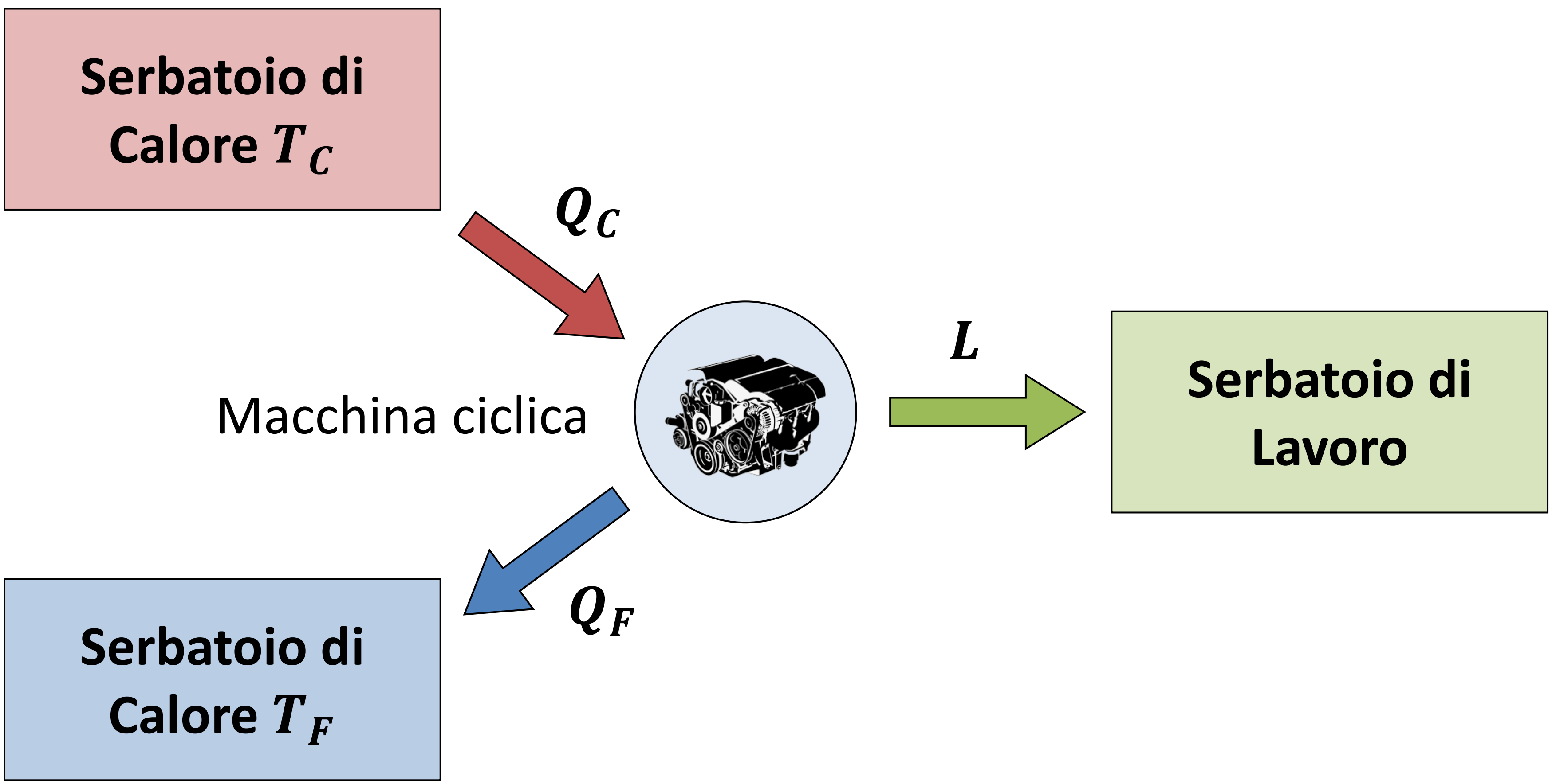
La macchina termodinamica è un sistema termodinamico composto ed isolato che, nella sua forma più semplice, è realizzato da:

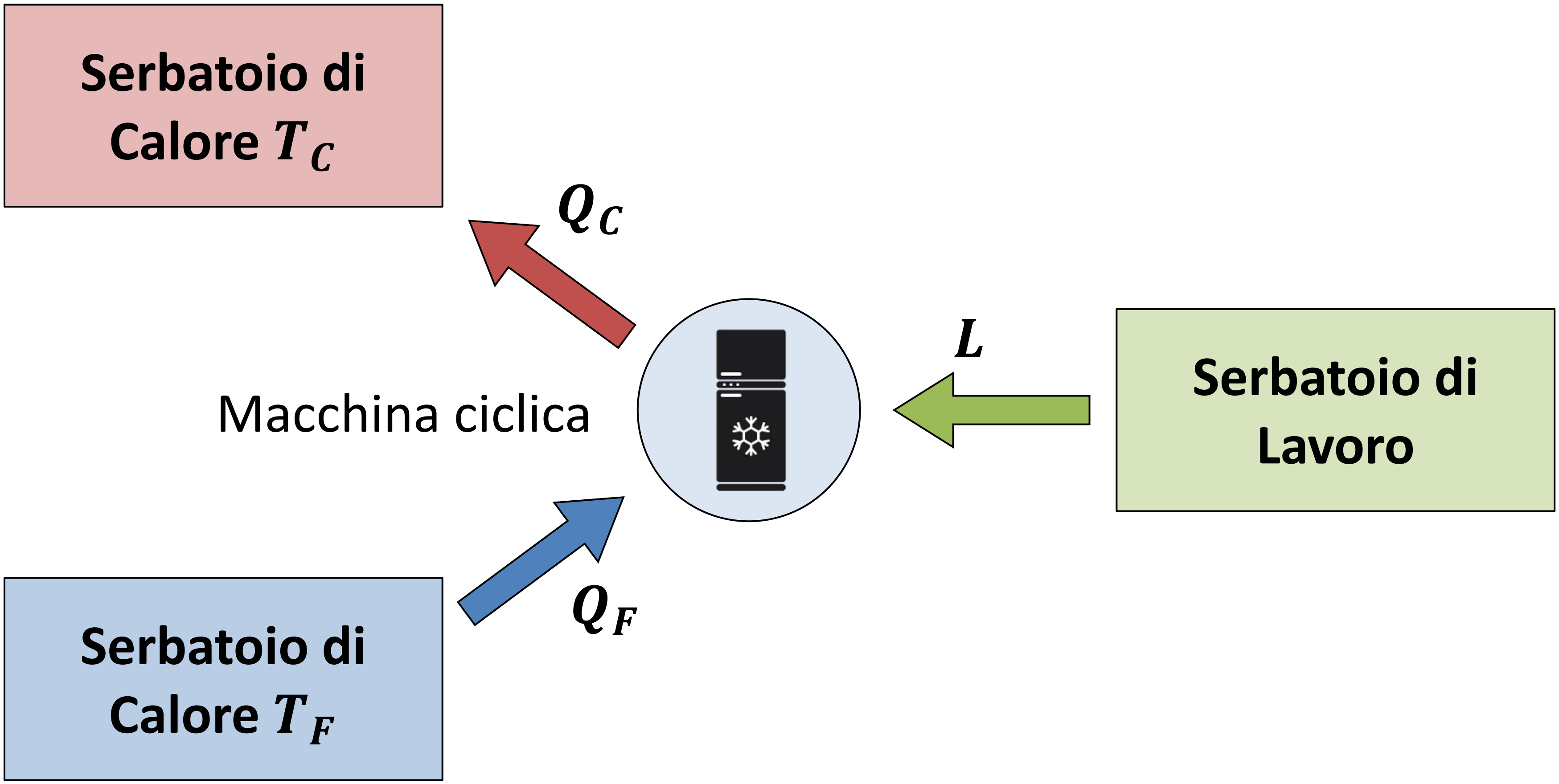
- due serbatoi di calore
- un serbatoio di lavoro
- una macchina ciclica

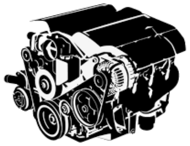
che è in grado di produrre od assorbire con continuità lavoro interagendo con il serbatoio di lavoro ed i serbatoi di calore

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

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


Serbatoio di Calore T_C
Q_C
Macchina ciclica
L
Serbatoio di Lavoro
Q_F
Serbatoio di Calore T_F


Serbatoio di Calore T_C
Q_C
Macchina ciclica
L
Serbatoio di Lavoro
Q_F
Serbatoio di Calore T_F



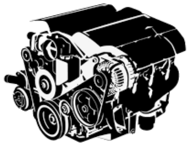
Dalle equazioni di bilancio:

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

Ma essendo…

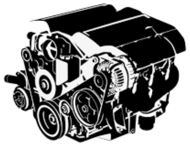
$$\begin{cases} \Delta U_C = Q_C^{\leftarrow} \\ \Delta S_C = \dfrac{Q_C^{\leftarrow}}{T_C} \end{cases} \qquad \begin{cases} \Delta U_F = Q_F^{\leftarrow} \\ \Delta S_F = \dfrac{Q_F^{\leftarrow}}{T_F} \end{cases} \qquad \begin{cases} \Delta U_{SL} = -L_{SL}^{\rightarrow} \\ \Delta S_{SL} = 0 \end{cases}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

…ne deriva…



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

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



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

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

Rendimento

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

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

Valido per serbatoi di calore a temperatura costante

Dalle equazioni di bilancio:

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

Ma essendo…

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

…ne deriva…

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

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

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

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

Efficienza o COP

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

$$\epsilon_F = \frac{Q_F}{L} = \frac{T_F}{T_C - T_F + \frac{T_C T_F S_{irr}}{Q_F}} \qquad \epsilon_{F,rev} = \frac{T_F}{T_C - T_F}$$

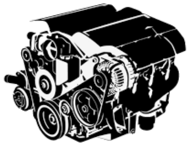
Macchina Frigorifera

$$\epsilon_P = \frac{Q_C}{L} = \frac{T_C}{T_C - T_F + \frac{T_C T_F S_{irr}}{Q_C}} \qquad \epsilon_{P,rev} = \frac{T_C}{T_C - T_F}$$

Pompa di calore

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 incomprimibile perfetto.

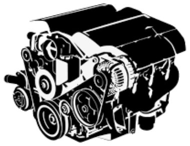
Dalle equazioni di bilancio

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

$$\boldsymbol{T_1 > T_2}$$

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

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

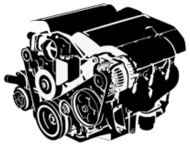


…ne deriva…

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

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

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



Caso reversibile: $S_{irr} = 0$

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

$Q_C = Mc(T_1 - T_2)$ 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

Se $S_{IRR} = 0$

↳ $Q_{F,REV}$

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

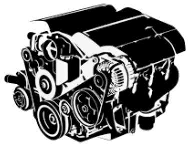
Caso reversibile: $S_{irr} = 0$

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

$$L = Q_C - \underbrace{Q_F}_{Q_{F,REV}} = Mc(T_1 - T_2) - McT_F \ln\frac{T_1}{T_2}$$ Valore assoluto

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

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

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