

Capitolo 6

Secondo principio della termodinamica

Fisica Tecnica

Ingegneria Navale – Ingegneria Civile e Ambientale

Ottobre 2023

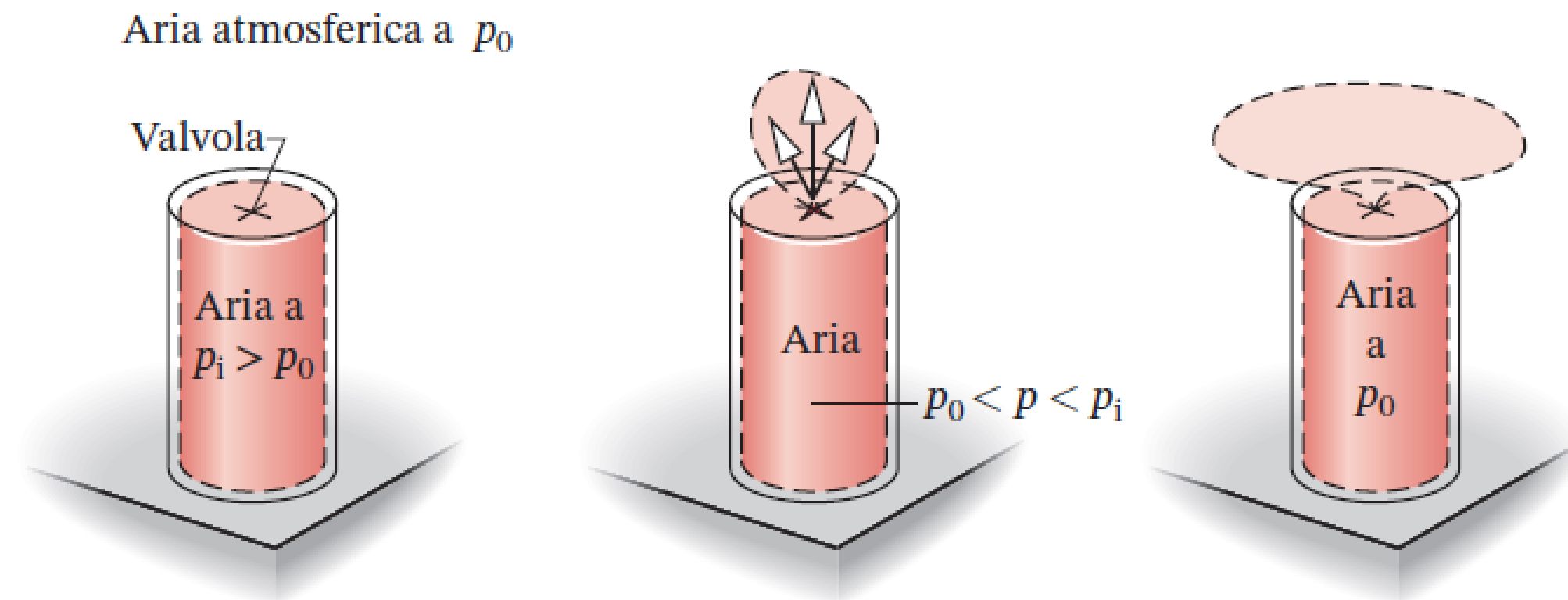
Sommario

- Introduzione
- Irreversibilità
- Cicli termodinamici tra due sorgenti
- Prestazioni massime dei cicli termodinamici
- Ciclo di Carnot

Introduzione - 1

Osservazioni

- Sono osservabili un gran numero di processi termodinamici naturali che, in base all'esperienza, non possono essere ripercorsi in senso inverso.
- Esiste una **direzione spontanea** secondo cui i processi termodinamici avvengono.
- Il Secondo Principio della Termodinamica codifica questa osservazione sperimentale.



Introduzione - 2

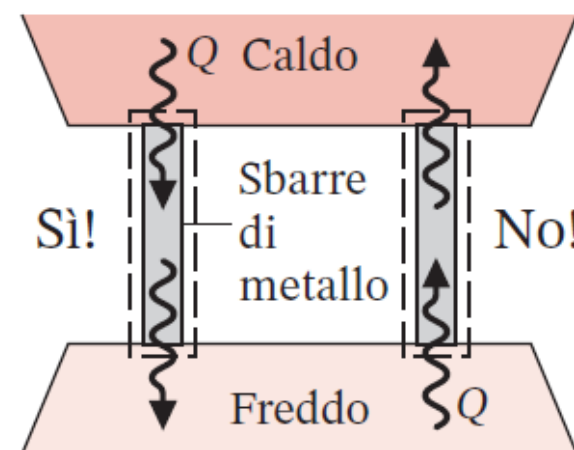
Enunciati del secondo principio

Sorgente termica/Serbatoio termico

Sistema che ha la particolarità di mantenere sempre costante la propria temperatura, anche se al sistema viene sottratta o fornita energia mediante scambio di calore.

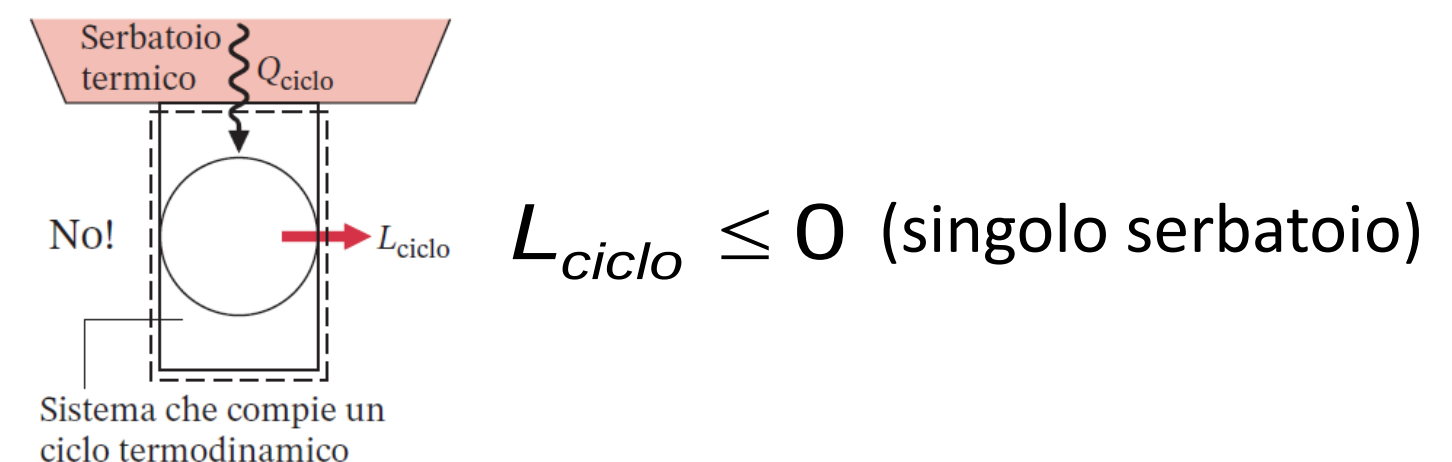
Enunciato secondo Clausius

Per qualsiasi sistema è impossibile operare in modo tale che l'unico effetto sia il trasferimento di calore da un corpo più freddo a uno più caldo



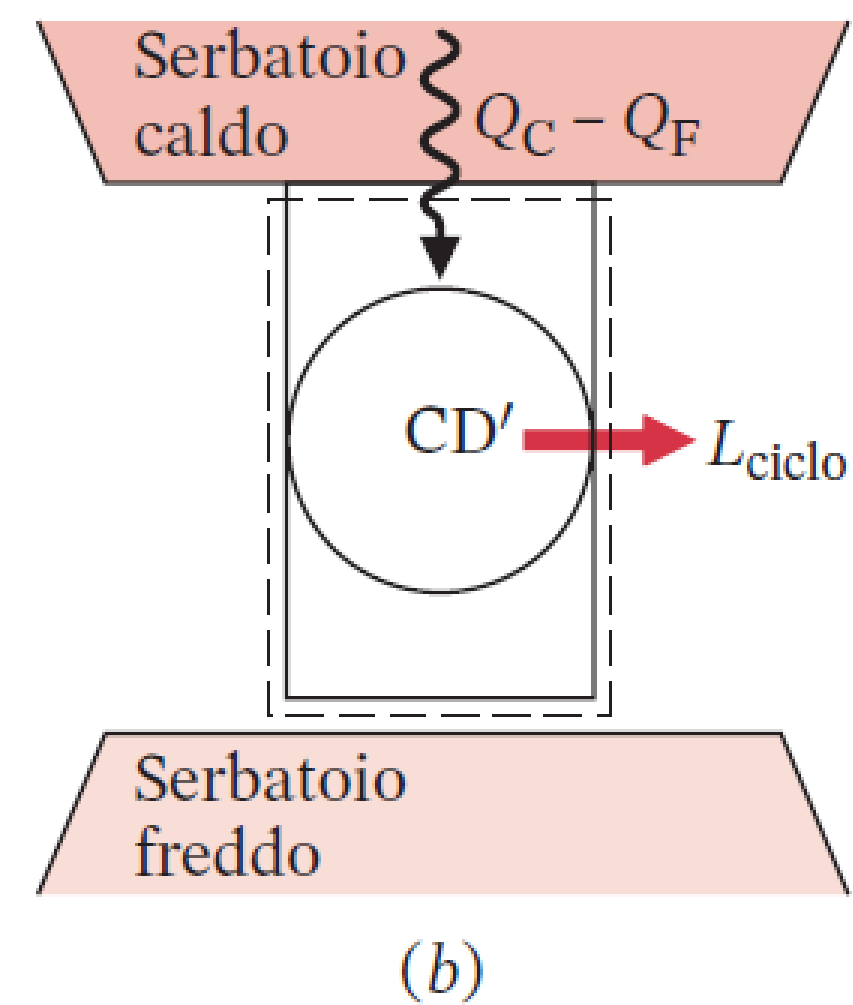
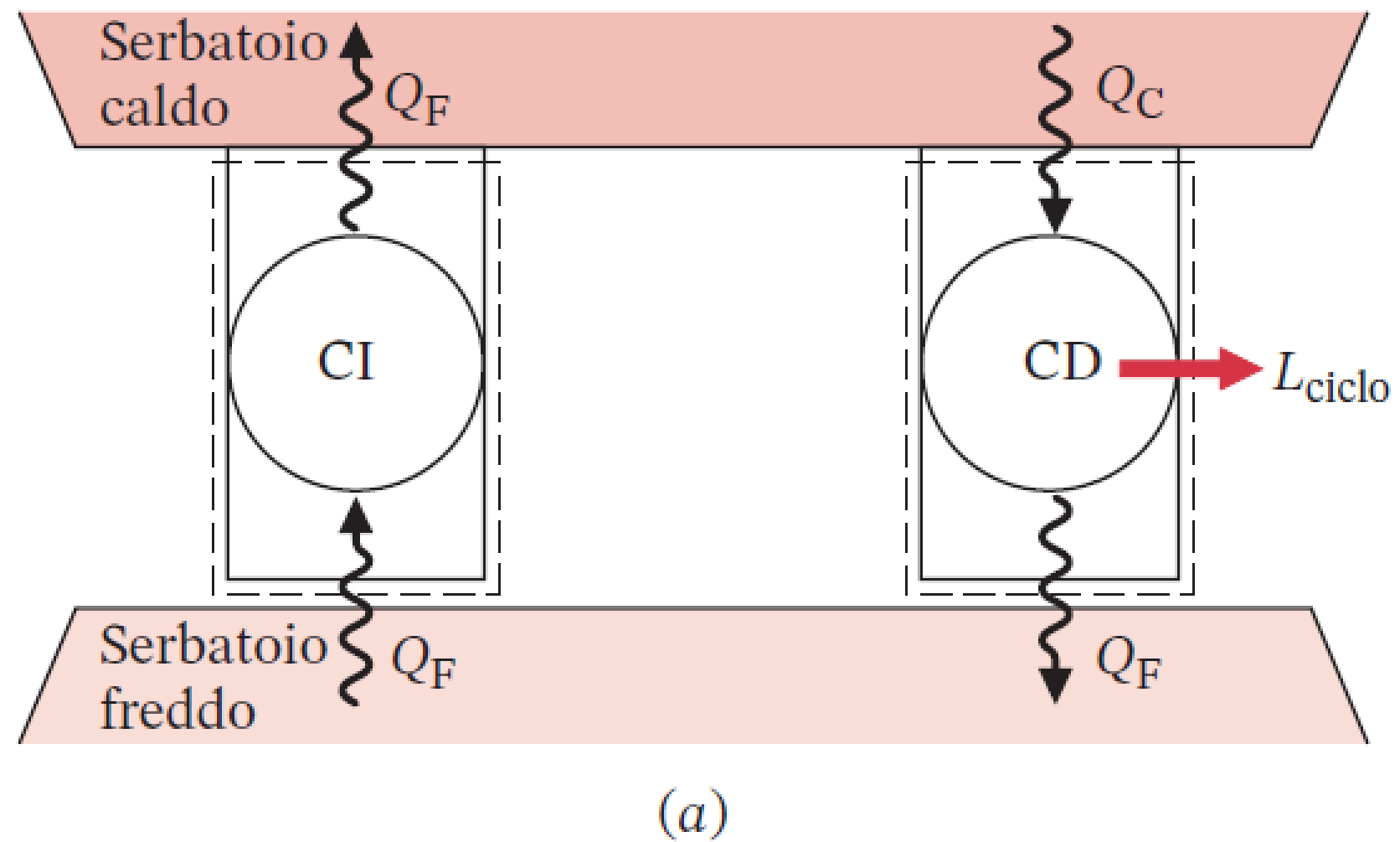
Enunciato secondo Kelvin-Planck

Non è possibile per un sistema operare secondo un ciclo termodinamico ed erogare un lavoro netto all'ambiente ricevendo energia sotto forma di calore da una sola sorgente termica



Introduzione - 3

Equivalenza dei due enunciati

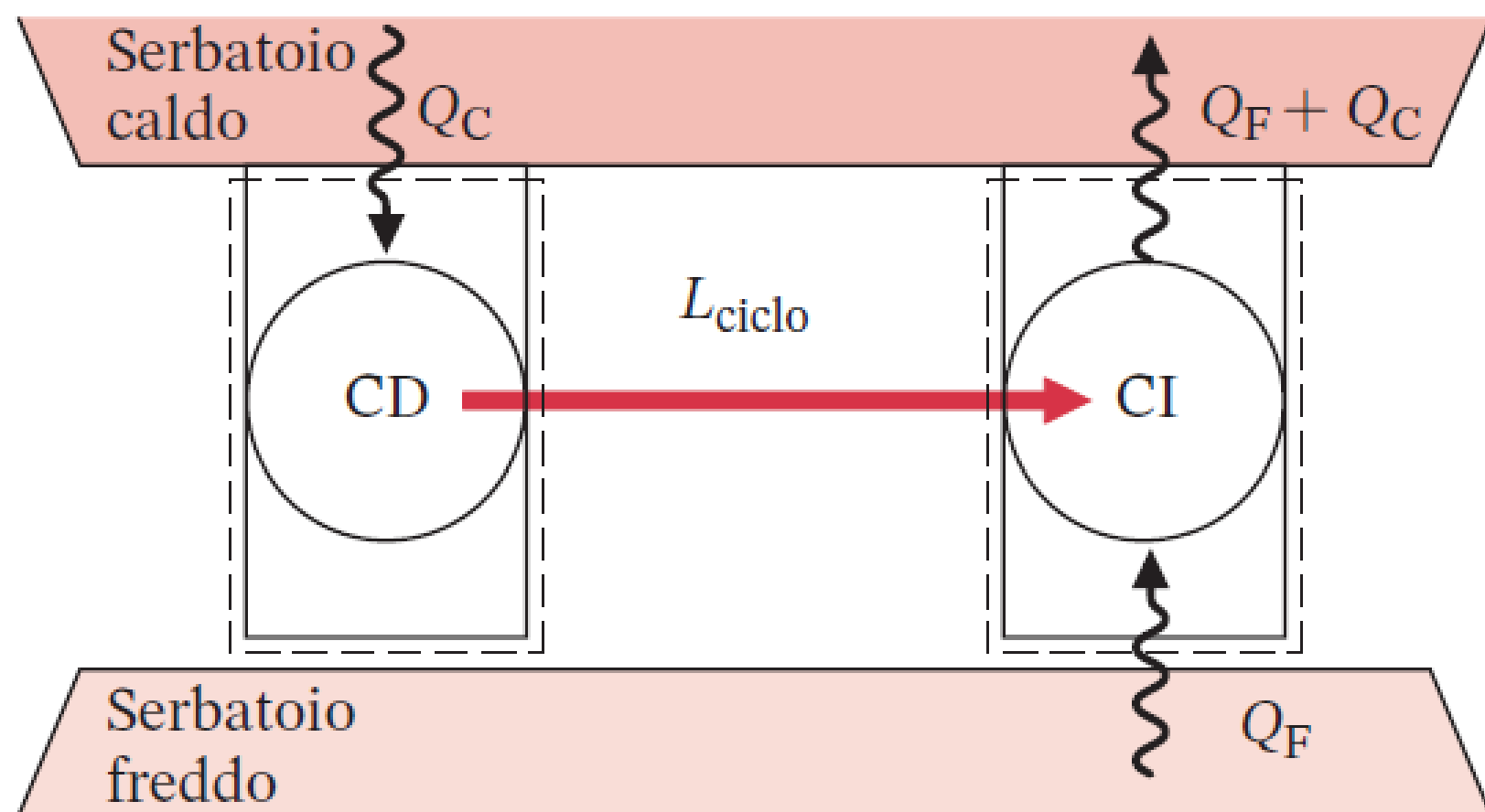


Violazione di
Clausius

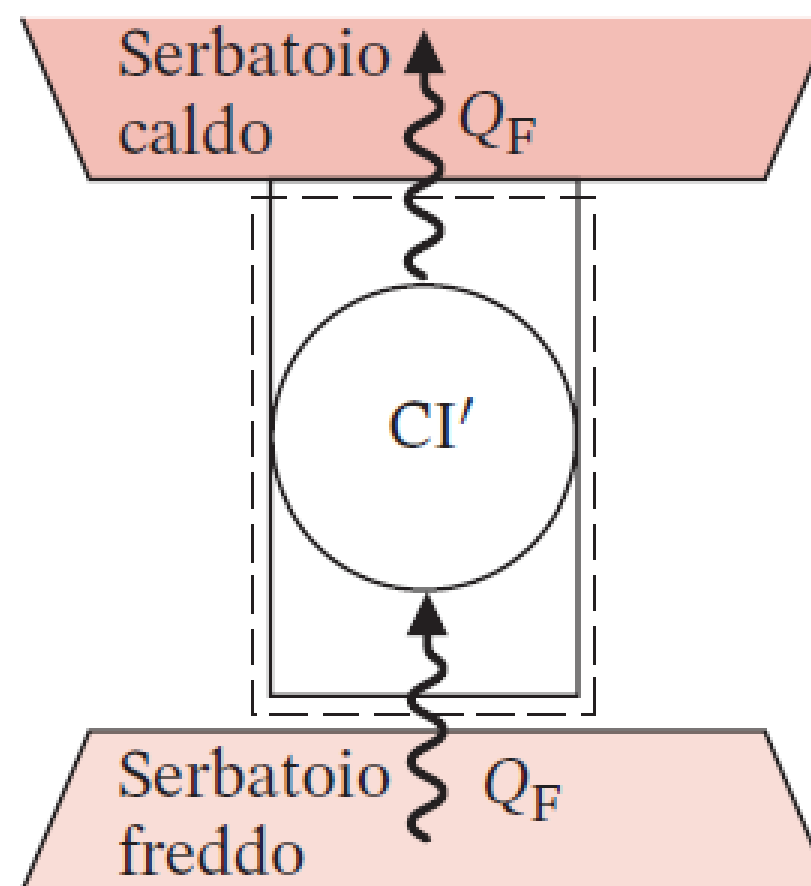
Violazione di
Kelvin Planck

Introduzione - 4

Equivalenza dei due enunciati



(a)



(b)

Violazione di
Kelvin Planck

Violazione di
Clausius

Irreversibilità - 1

Definizioni

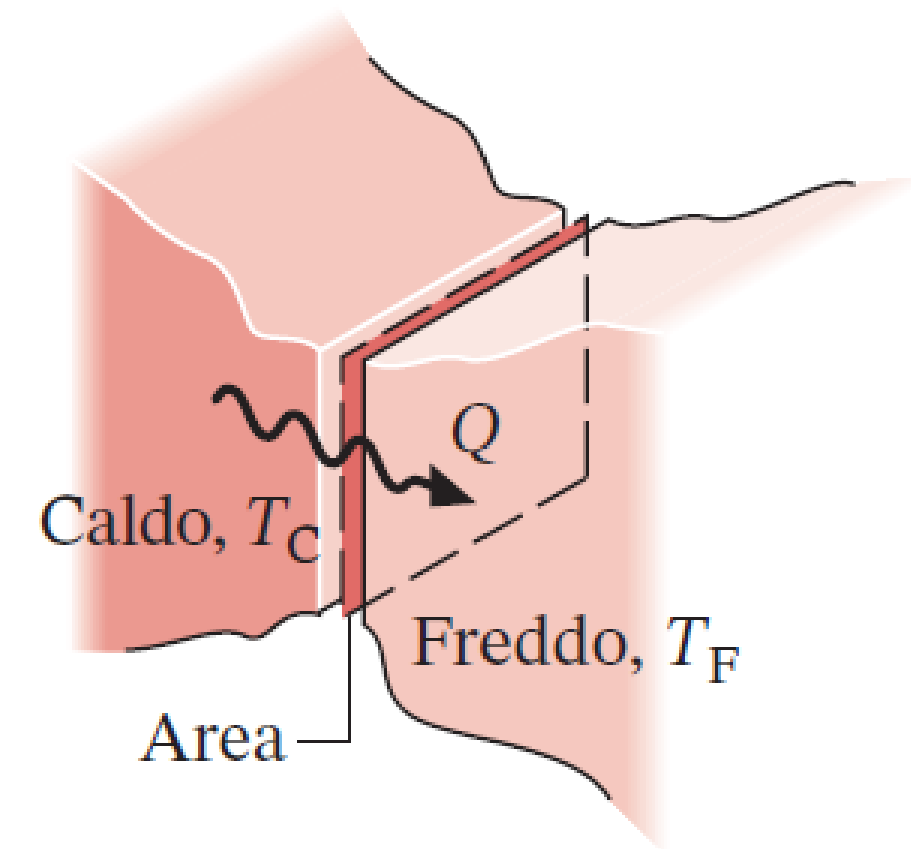
Processo reversibile

Processo di un sistema A al termine del quale è possibile riportare allo stato iniziale sia il sistema A che il suo ambiente.

Processo irreversibile

Processo di un sistema A al termine del quale non è possibile riportare allo stato iniziale sia il sistema A che il suo ambiente.

I processi reali sono irreversibili.

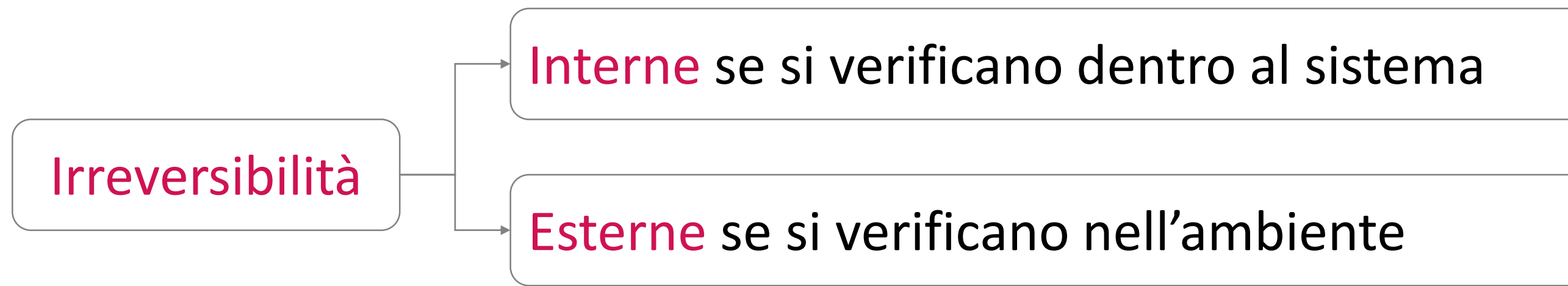


Irreversibilità - 2

Esempi di irreversibilità:

- Scambio termico sotto differenza finita di temperatura
- Espansione libera di gas o liquido in pressione
- Reazione chimica
- Miscelazione di sostanze diverse o in diverso stato iniziale
- Effetti di attrito
- Passaggio di corrente elettrica
- Magnetizzazione o polarizzazione con isteresi
- Deformazioni anelastiche

Irreversibilità - 3



Processo internamente reversibile è un processo in cui non sono presenti irreversibilità all'interno del sistema. Processo di quasi-equilibrio o quasi-statico.

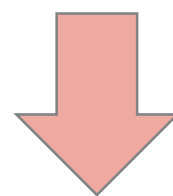
Trasformazione ciclica

- Lo stato iniziale coincide con quello finale

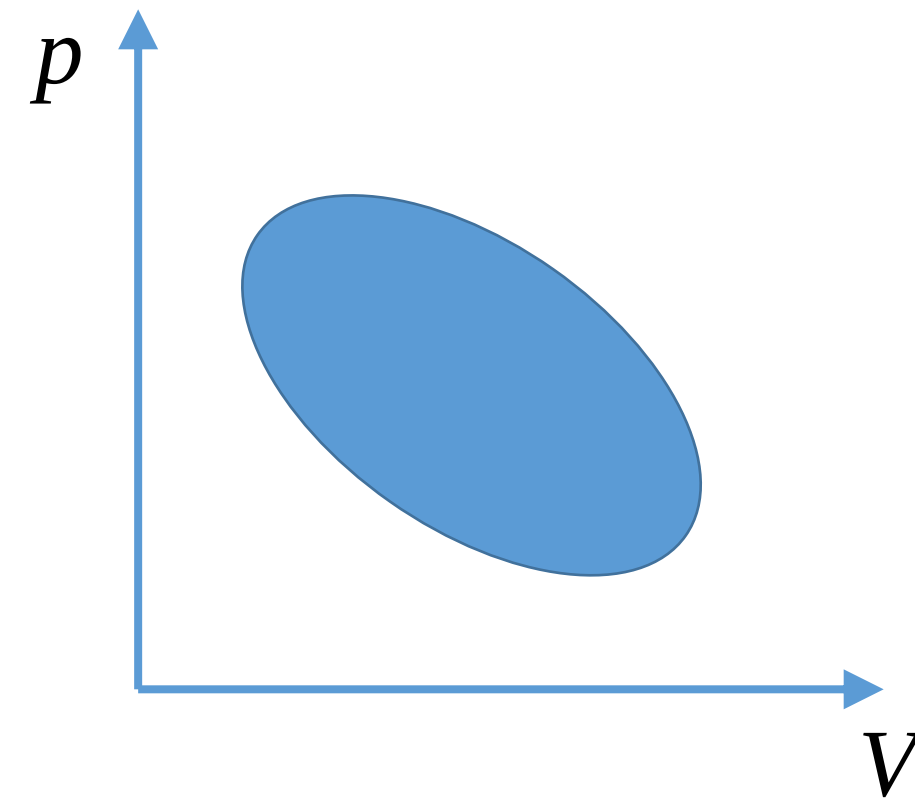
$$E_{iniziale} = E_{finale}$$

$$\Delta E_{ciclo} = E_{finale} - E_{iniziale} = 0$$

$$\Delta E_{ciclo} = Q_{ciclo} - L_{ciclo}$$

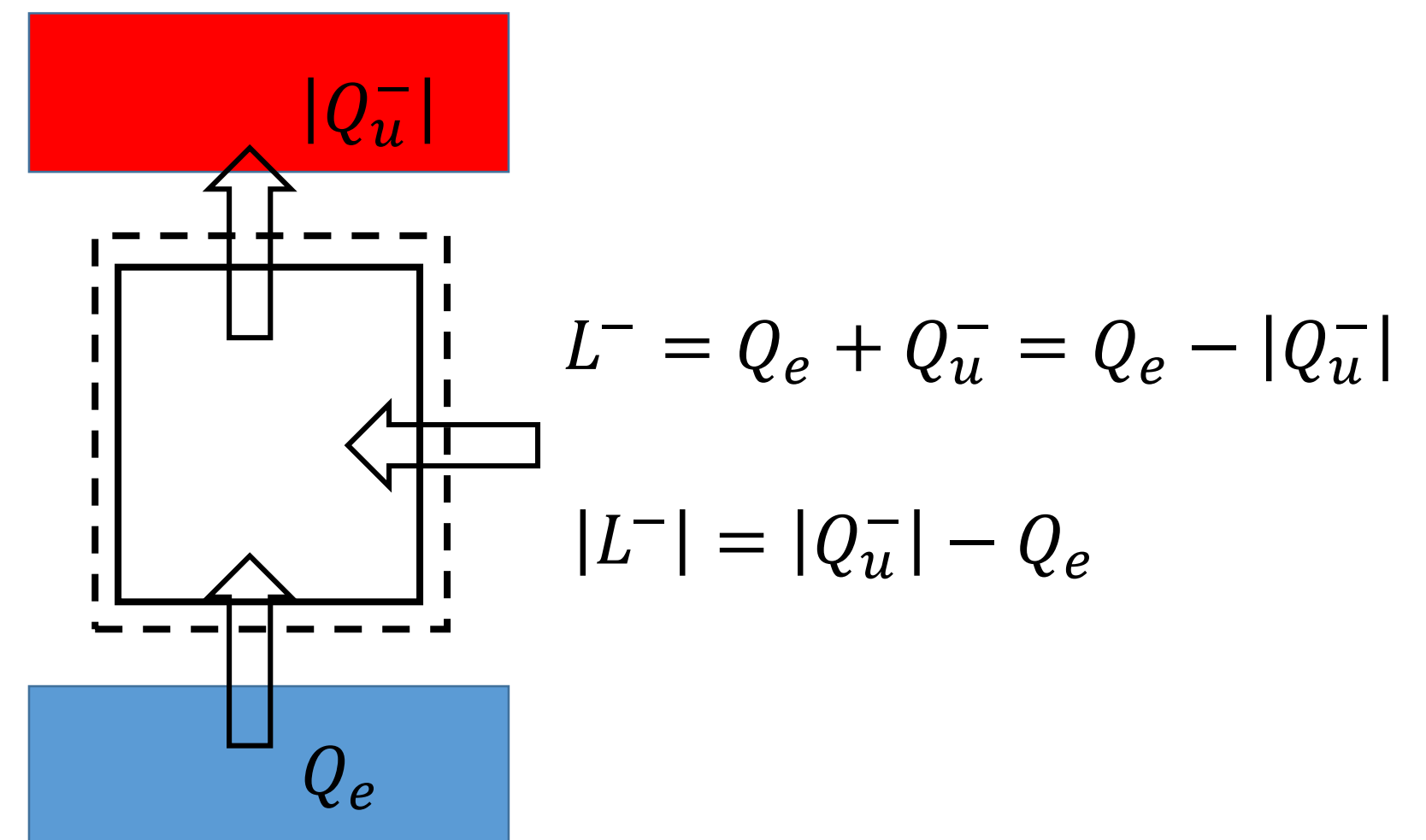
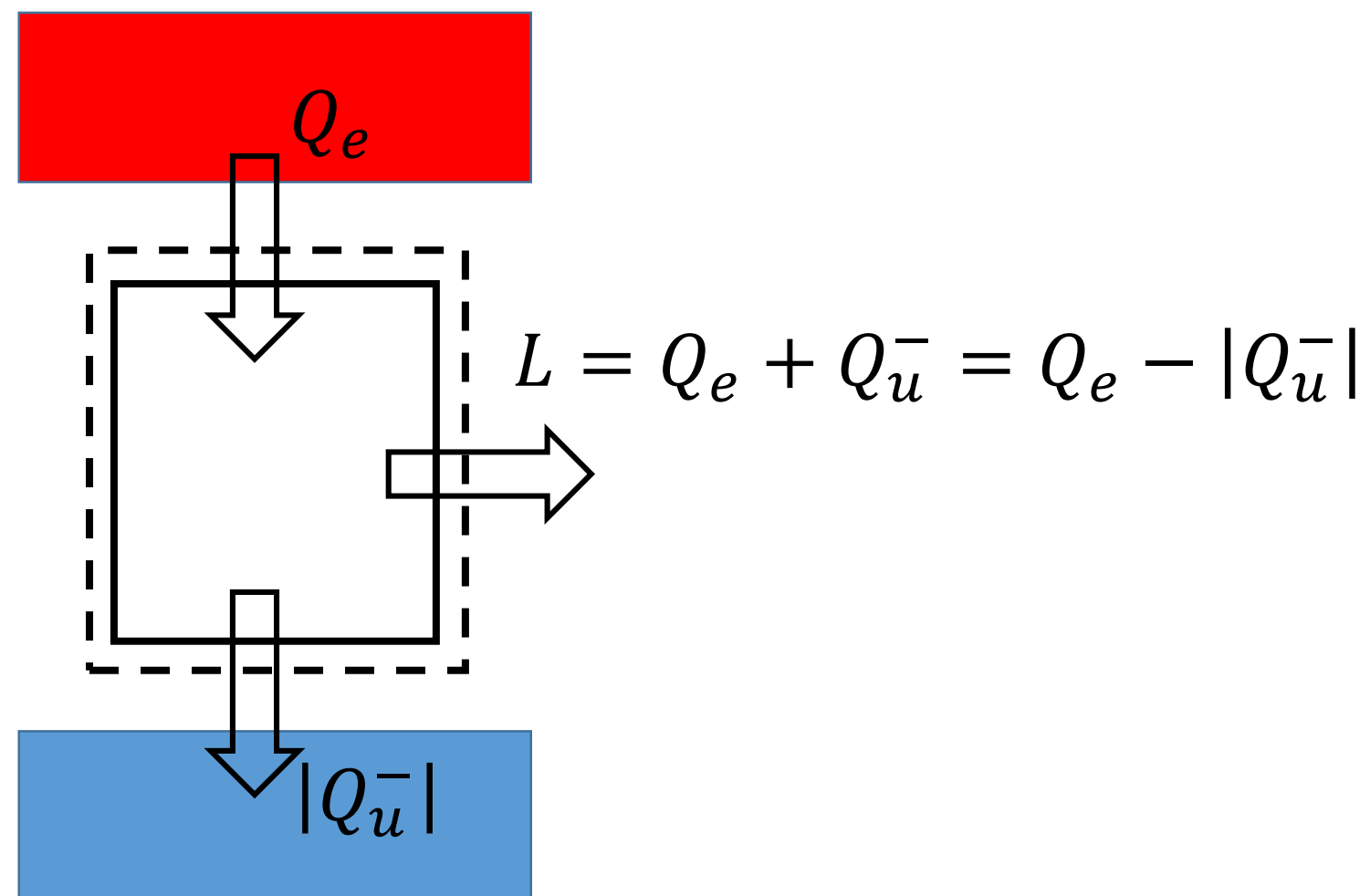


$$L_{ciclo} = Q_{ciclo}$$



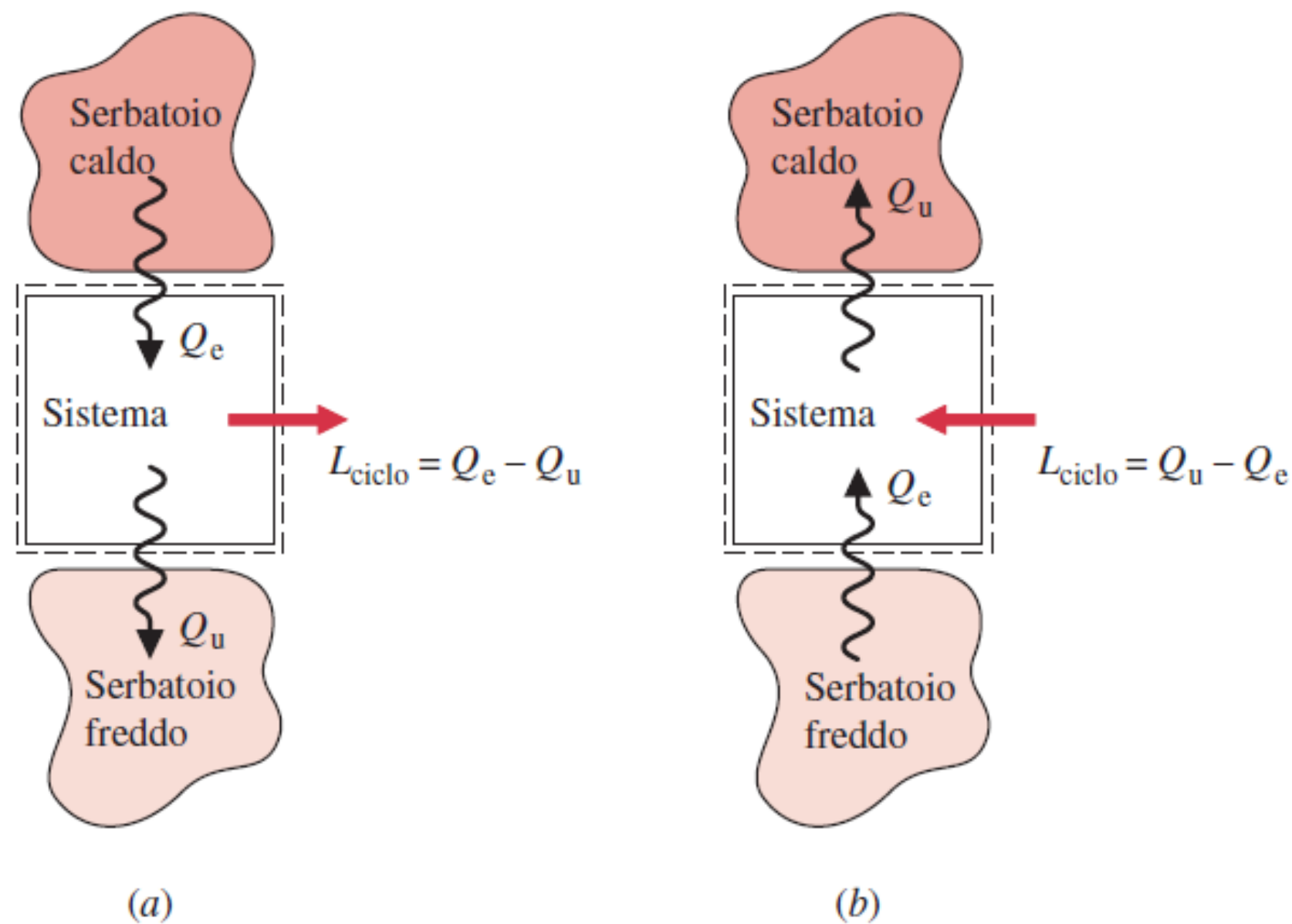
Secondo principio applicato ai cicli termodinamici - 1

Bilancio energetico per cicli

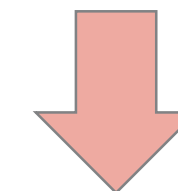


Secondo principio applicato ai cicli termodinamici - 1

Bilancio energetico per cicli



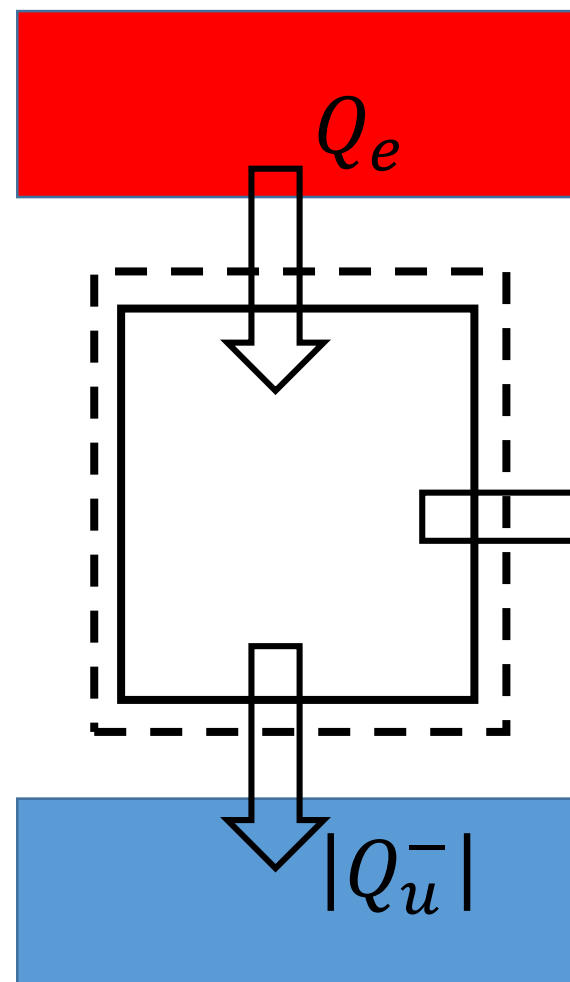
$$\Delta E_{ciclo} = Q_{ciclo} - L_{ciclo}$$



$$L_{ciclo} = Q_{ciclo}$$

Secondo principio applicato ai cicli termodinamici - 2

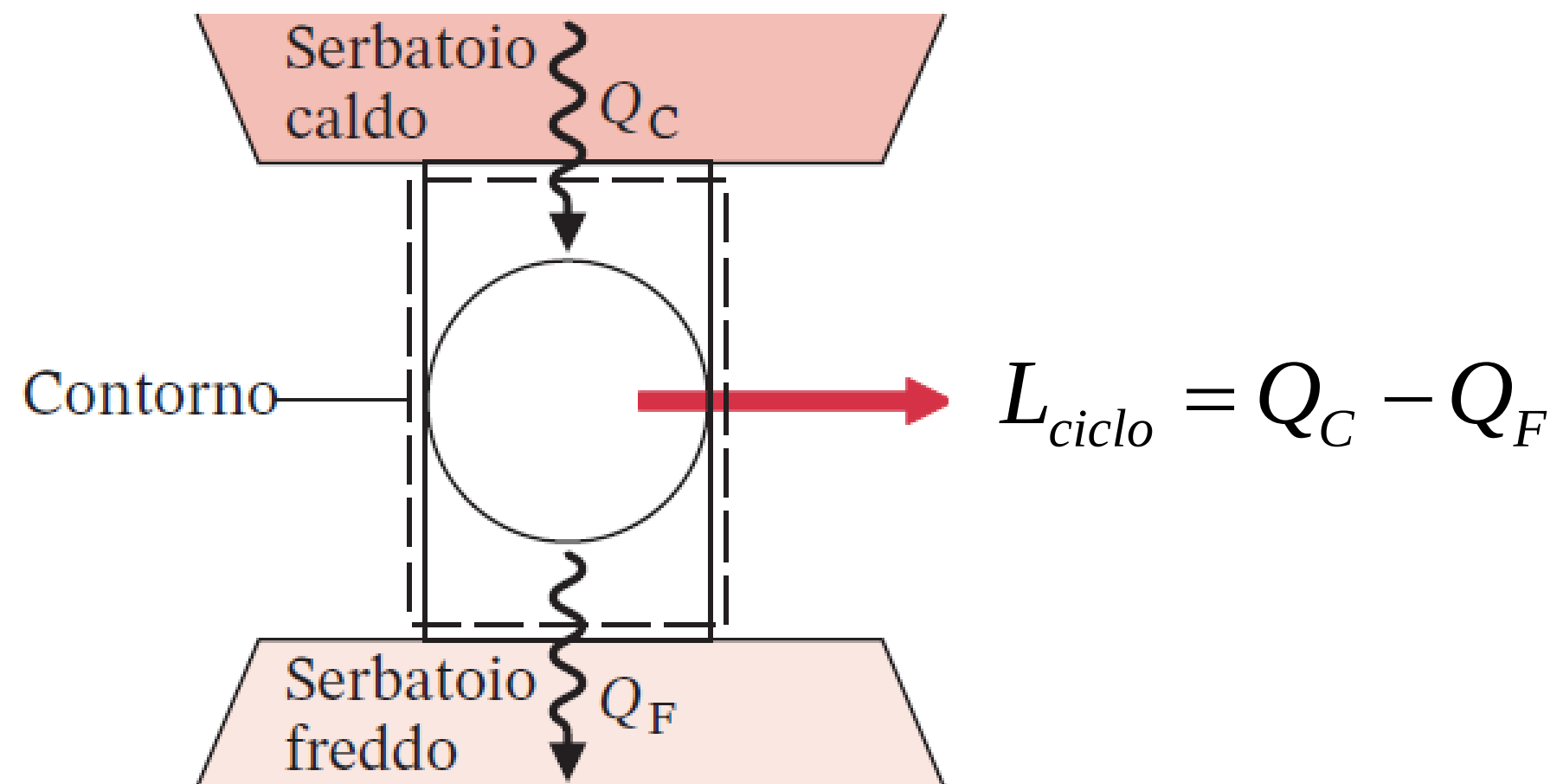
Cicli motore



$$\begin{aligned} L_{ciclo} &= Q_e + Q_u^- \\ L_{ciclo} &= Q_e - |Q_u^-| \end{aligned}$$

$$\eta = \frac{L_{ciclo}}{Q_e} = 1 - \frac{|Q_u^-|}{Q_e} < 1$$

Cicli termodinamici tra due sorgenti - 1

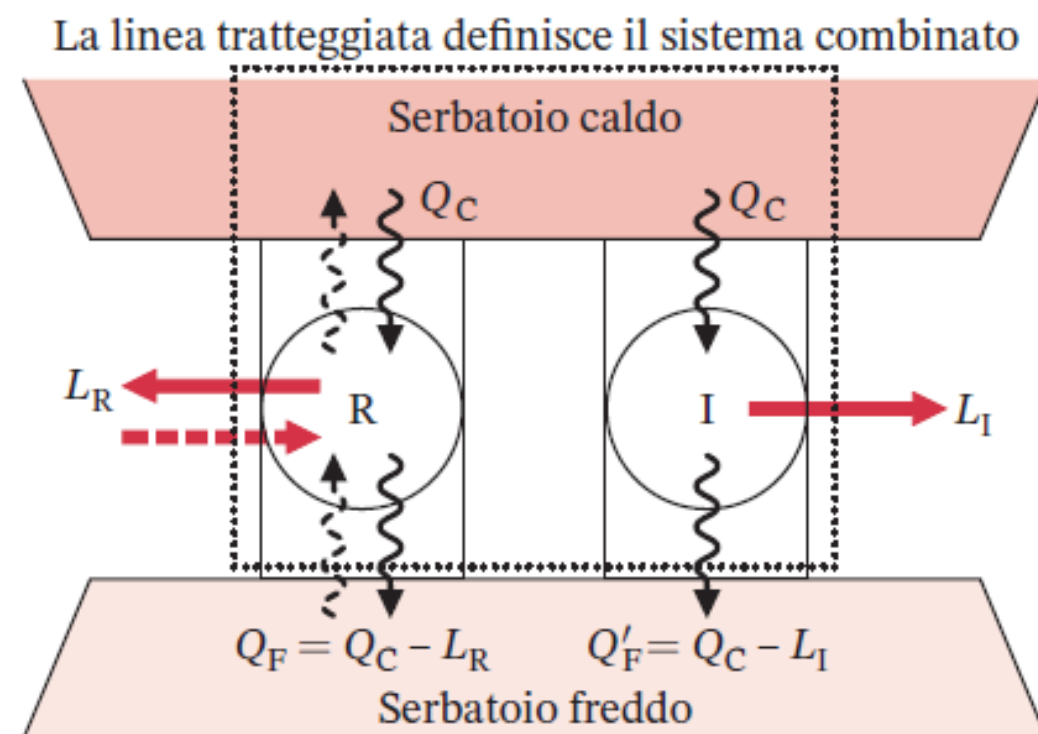


$$\eta = \frac{L_{ciclo}}{Q_C} = 1 - \frac{Q_F}{Q_C} < 1$$

Cicli termodinamici tra due sorgenti - 2

Corollari di Carnot

1. Il rendimento termico di un ciclo irreversibile è sempre inferiore al rendimento termico di un ciclo reversibile operante tra le stesse due sorgenti termiche.
2. Tutti i cicli diretti reversibili operanti tra le stesse due sorgenti termiche hanno lo stesso rendimento termico.

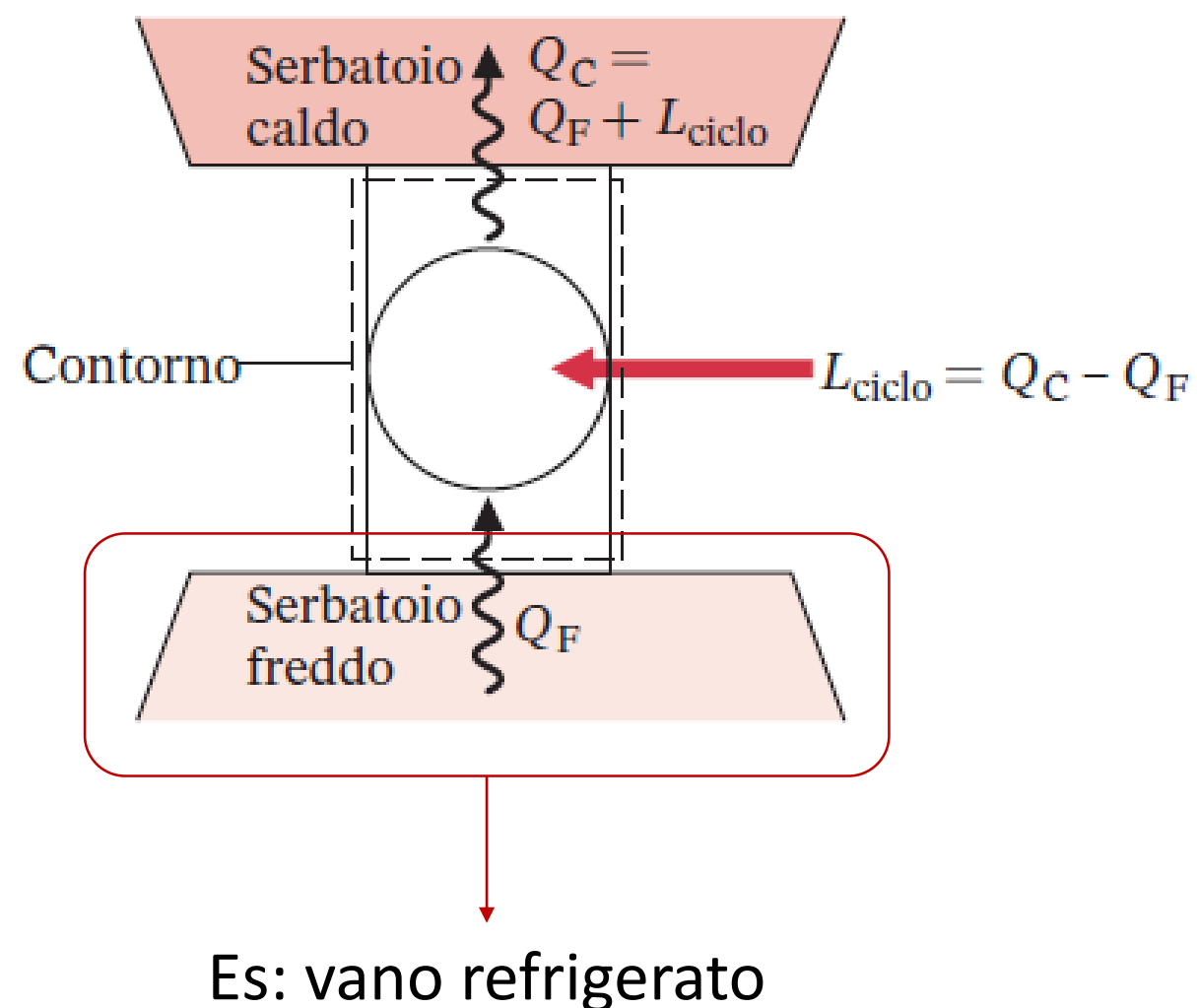


$$L_i < L_r$$

Ciclo reversibile se:

1. non sono presenti irreversibilità all'interno del sistema che compie il ciclo;
2. il trasferimento di calore tra il sistema e le sorgenti termiche avviene in maniera reversibile.

Cicli termodinamici tra due sorgenti - 3



Macchina frigorifera

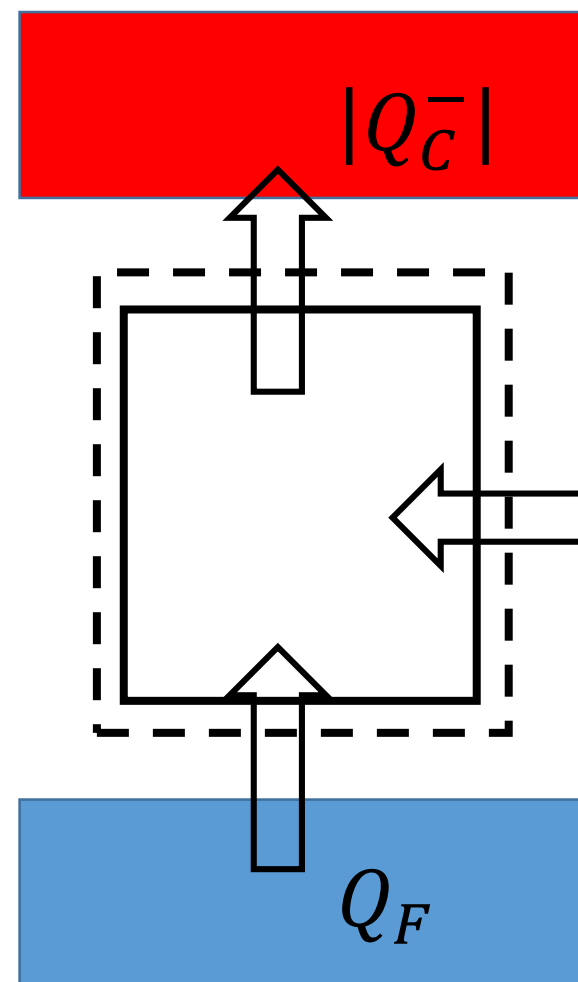
Macchina ciclica destinata a sottrarre calore da un serbatoio termico a bassa temperatura

Coefficiente di prestazione di macchina frigorifera (COP_f)

Rapporto tra quantità di calore sottratta al serbatoio a bassa temperatura e lavoro netto

$$COP_f = \frac{Q_e}{Q_u - Q_e} = \frac{Q_e}{L_{\text{ciclo}}}$$

Cicli termodinamici tra due sorgenti - 3



$$L_{ciclo}^- = Q_C^- + Q_F^+$$
$$|L_{ciclo}^-| = |Q_C^-| - Q_F$$

Macchina frigorifera

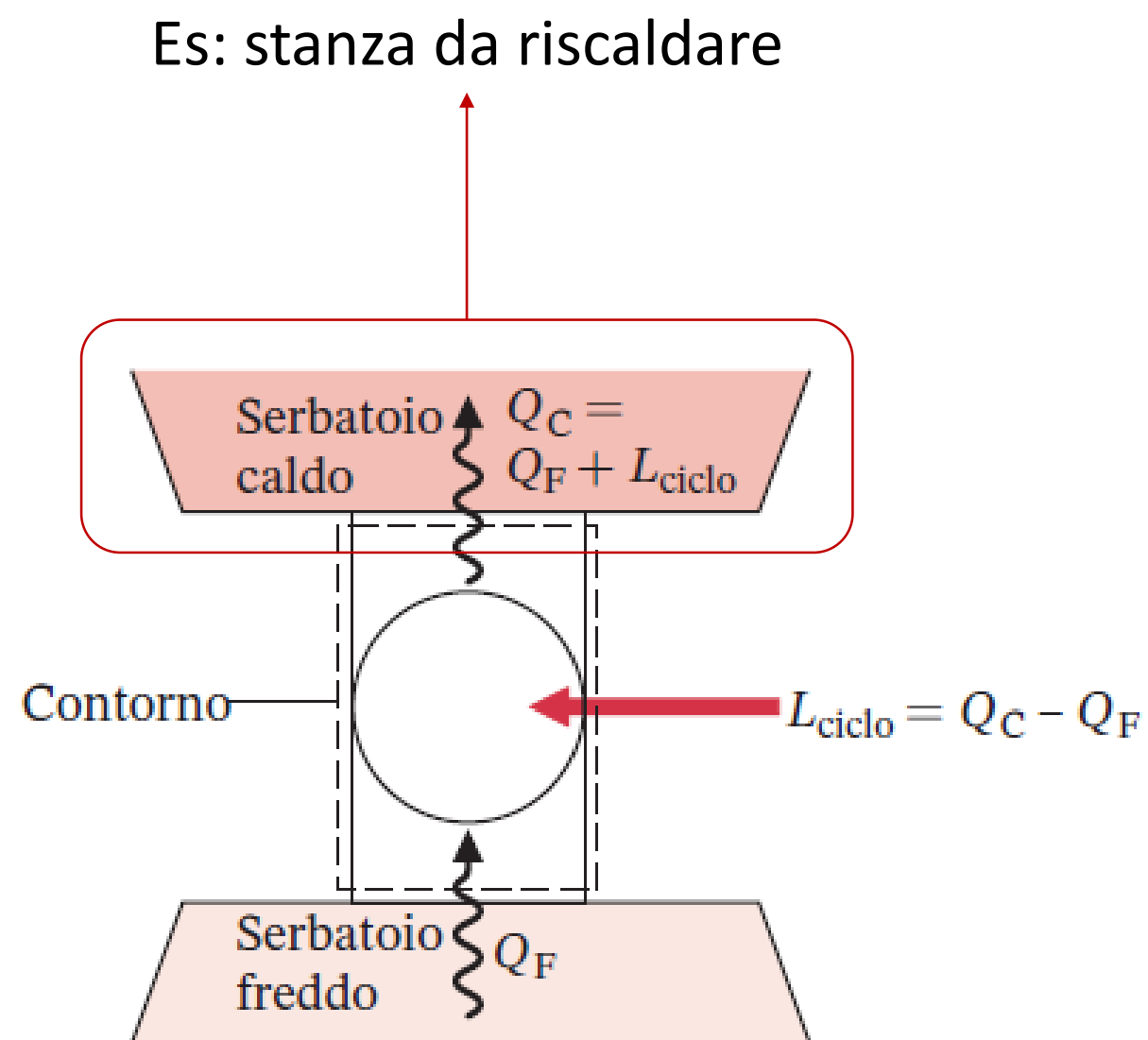
Macchina ciclica destinata a sottrarre calore da un serbatoio termico a bassa temperatura

Coefficiente di prestazione di macchina frigorifera (COP_f)

Rapporto tra quantità di calore sottratta al serbatoio a bassa temperatura e lavoro netto

$$COP_F = \frac{Q_F}{|Q_C^-| - Q_F} = \frac{Q_F}{|L_{ciclo}^-|}$$

Cicli termodinamici tra due sorgenti - 4



Pompa di calore

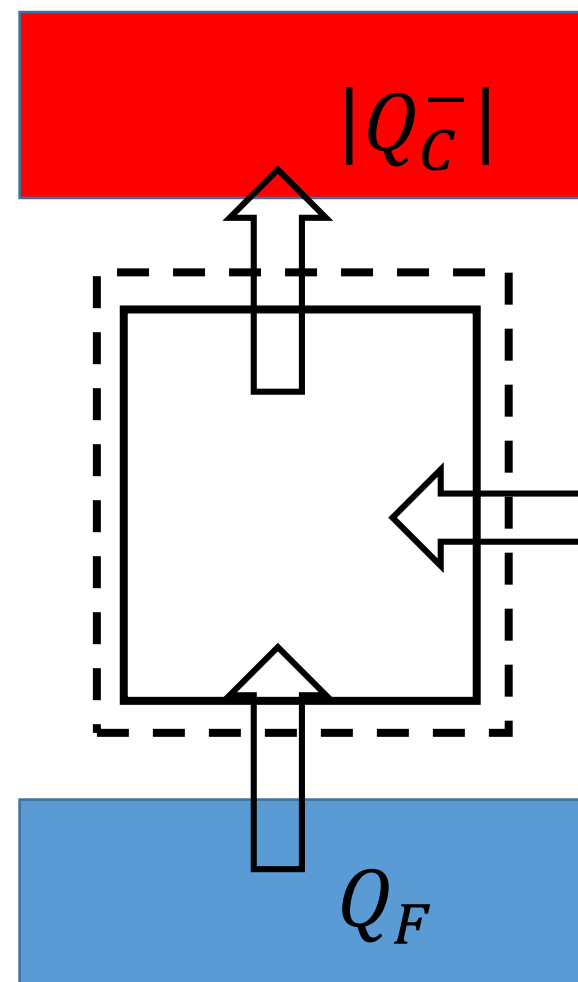
Macchina ciclica destinata a fornire calore ad un serbatoio termico ad alta temperatura

Coefficiente di prestazione pompa di calore (COP_{pdc})

Rapporto tra quantità di calore ceduta al serbatoio termico ad alta temperatura e lavoro netto assorbito dalla macchina

$$COP_{pdc} = \frac{Q_u}{Q_u - Q_e} = \frac{Q_u}{L_{\text{ciclo}}}$$

Cicli termodinamici tra due sorgenti - 3



$$L_{ciclo}^- = Q_C^- + Q_F^+ \\ |L_{ciclo}^-| = |Q_C^-| - Q_F$$

Pompa di Calore

Macchina ciclica destinata a sottrarre calore da un serbatoio termico a bassa temperatura

Coefficiente di prestazione di macchina frigorifera (COP_{PDC})

Rapporto tra quantità di calore fornita al serbatoio ad alta temperatura e lavoro netto

$$COP_{PDC} = \frac{|Q_C^-|}{|Q_C^-| - Q_F} = \frac{|Q_C^-|}{|L_{ciclo}^-|}$$

Prestazioni massime cicli termodinamici - 1

Scala termodinamica delle temperature

2° corollario
Carnot

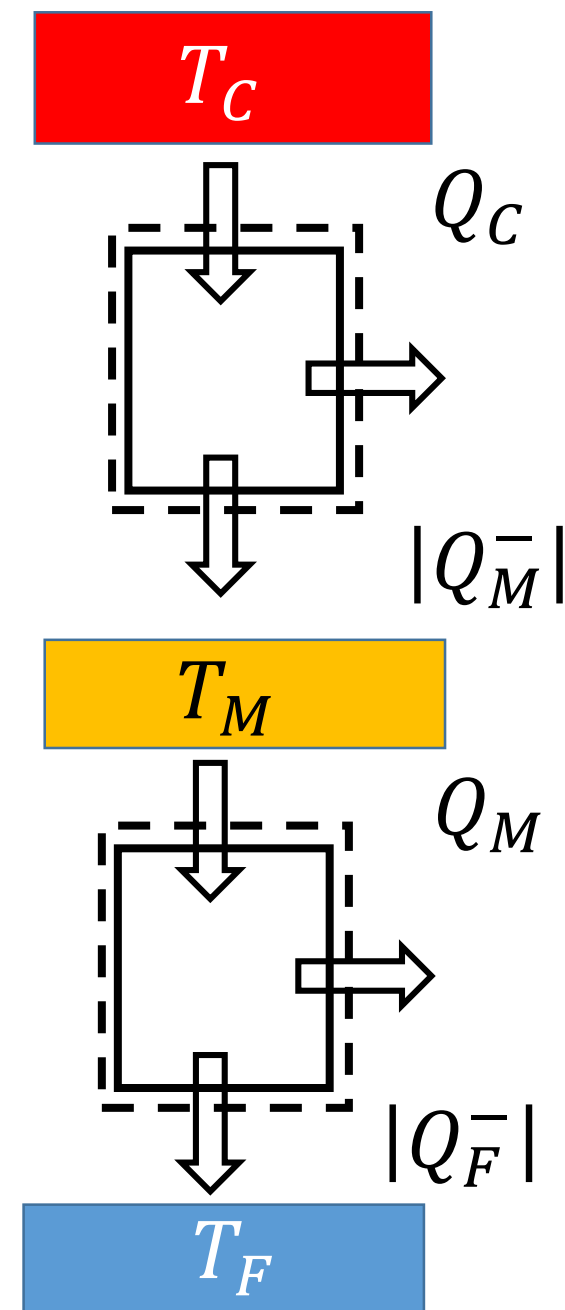
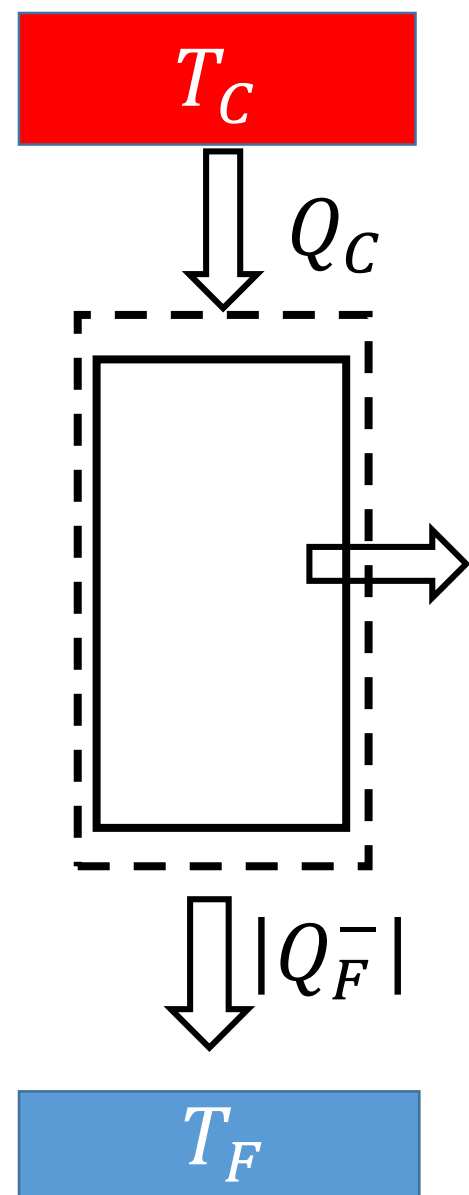
Rendimento cicli motore reversibili
dipende solo dalle T delle due sorgenti

$$\eta_{ciclo\ rev} = 1 - \left(\frac{Q_F}{Q_C} \right)_{ciclo\ rev}$$

$$\Rightarrow \frac{T_F}{T_C} = \left(\frac{Q_F}{Q_C} \right)_{ciclo\ rev}$$

Questo consente di definire una scala di temperatura
indipendente dalle proprietà dei corpi termometrici
(Scala Termodinamica o Scala Kelvin)

Temperatura Termodinamica



$$\frac{|Q_F|}{Q_C} = f(T_F, T_C)$$

$$\frac{|Q_M^-|}{Q_C} = f(T_M, T_C)$$

$$\frac{|Q_F^-|}{Q_M} = f(T_F, T_M)$$

$$\frac{|Q_F^-|}{Q_C} = \frac{|Q_F^-|}{Q_M} \cdot \frac{|Q_M^-|}{Q_C}$$

$$f(T_F, T_C) = f(T_F, T_M) \cdot f(T_M, T_C)$$

Temperatura Termodinamica

$$f(T_F, T_C) = f(T_F, T_M) \cdot f(T_M, T_C)$$

$$f(T_F, T_M) = \frac{\varphi(T_F)}{\varphi(T_M)} \quad f(T_M, T_C) = \frac{\varphi(T_M)}{\varphi(T_C)}$$

$$\frac{|Q_F|}{Q_C} = f(T_F, T_C) = \frac{\varphi(T_F)}{\varphi(T_M)} \cdot \frac{\varphi(T_M)}{\varphi(T_C)} = \frac{\varphi(T_F)}{\varphi(T_C)}$$

$$\varphi(T) = T$$

$$T = T_C \cdot \left(\frac{Q}{Q_T} \right)_{rev}$$

- La funzione tra T_F e T_C è indipendente da T_M
- Nel prodotto delle funzioni la dipendenza si deve elidere, per qualsiasi valore di T_M
- Funzione rapporto di due altre funzioni
- Posso introdurre la temperatura assoluta T

Prestazioni massime cicli termodinamici - 2

Scala termodinamica delle temperature

La scala termodinamica di temperatura è completata con la scelta di un valore numerico ad uno stato termodinamico ben riproducibile di una sostanza pura. Scala Kelvin: punto triplo dell'acqua.

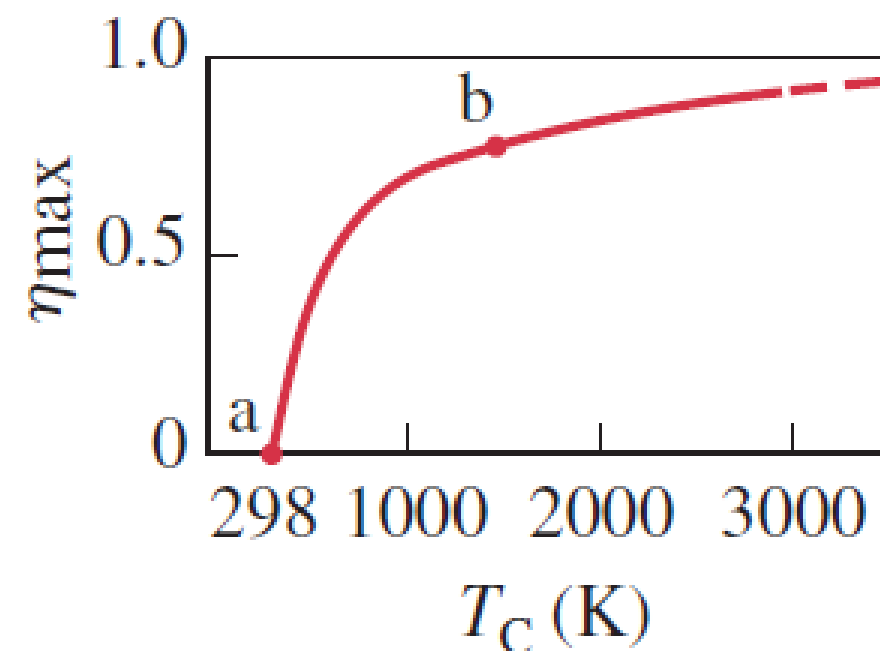
$$T = 273.16 \left(\frac{Q}{Q_T} \right)$$

Prestazioni massime cicli termodinamici - 3

Cicli motore

Rendimento massimo di ciclo motore
(rendimento di Carnot)

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{T_F}{T_C}$$



Esempio

Rendimento di Carnot
rispetto a T_C ($T_F = 298$ K)

Commenti:

1. Comuni cicli diretti $\eta = 40\%$
2. Per i cicli diretti si definisce anche il rendimento di secondo principio

$$\eta_{II} = \frac{\eta}{\eta_{ideale}}$$

Prestazioni massime cicli termodinamici - 4

Cicli frigoriferi e pompe di calore

Rendimento massimo di ciclo frigorifero reversibile

$$COP_{f,\max} = \frac{T_F}{T_C - T_F}$$

Rendimento massimo pompa di calore reversibile

$$COP_{pdc,\max} = \frac{T_C}{T_C - T_F}$$