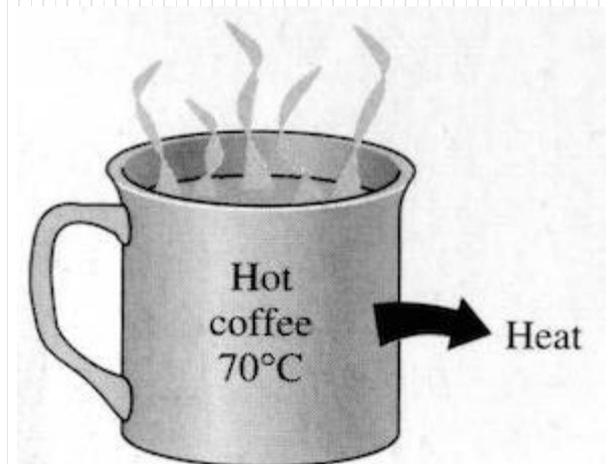


# *Il secondo principio della termodinamica*

# Introduzione

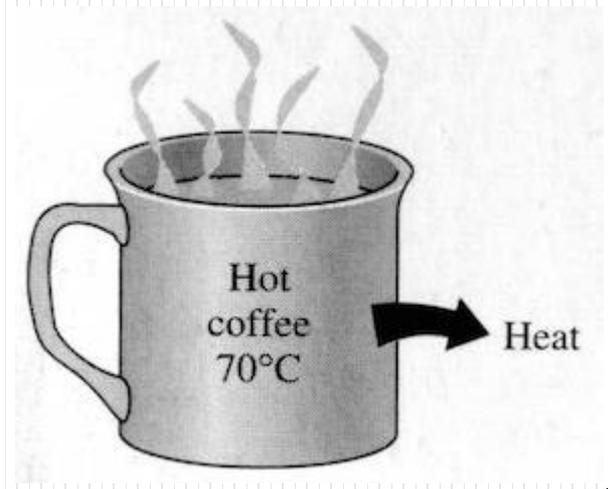
- Il 1° principio afferma che l'energia è una grandezza che si conserva
- Una tazza di caffè caldo lasciata in un ambiente più freddo si raffredda, cedendo il calore all'ambiente circostante.
- **È esperienza comune che non avviene mai il processo inverso!**

**Le trasformazioni spontanee avvengono secondo un certo verso!**



# Il secondo Principio

- Il 2° Principio della termodinamica:
  - **Individua il verso della trasformazione;**
  - **Fornisce i mezzi per determinare la qualità dell'energia e per quantificare il degrado a seguito di una trasformazione.**



## I serbatoi di energia termica

Il **serbatoio di energia termica**, o serbatoio di calore, è un corpo **di capacità Termica** (Massa per calore specifico) **relativamente grande** in grado di fornire o assorbire una qualsiasi quantità infinita di calore senza subire alcuna variazione di temperatura.

In pratica **gli oceani, i laghi, i fiumi e la stessa atmosfera** possono essere considerati **serbatoi di calore**

I **serbatoi di calore** che **forniscono energia** sono detti **sorgenti**, mentre quelli che lo **assorbono** sono detti **pozzi**

# IRREVERSIBILITÀ DEI PROCESSI NATURALI

Una trasformazione reversibile, nella termodinamica, è una trasformazione termodinamica di un sistema termodinamico che, dopo aver avuto luogo, può essere invertita riportando il sistema e l'ambiente nelle condizioni iniziali, senza che ciò comporti alcun cambiamento nel sistema stesso e nell'universo

Tutti i **processi spontanei** che implicano scambio di calore o trasformazione di energia meccanica in calore **sono irreversibili**

# Motori Termici

- Il lavoro può essere convertito in altre forme di energia, ma al contrario la conversione di altre forme di energia in lavoro non è spontanea.

## Esempio

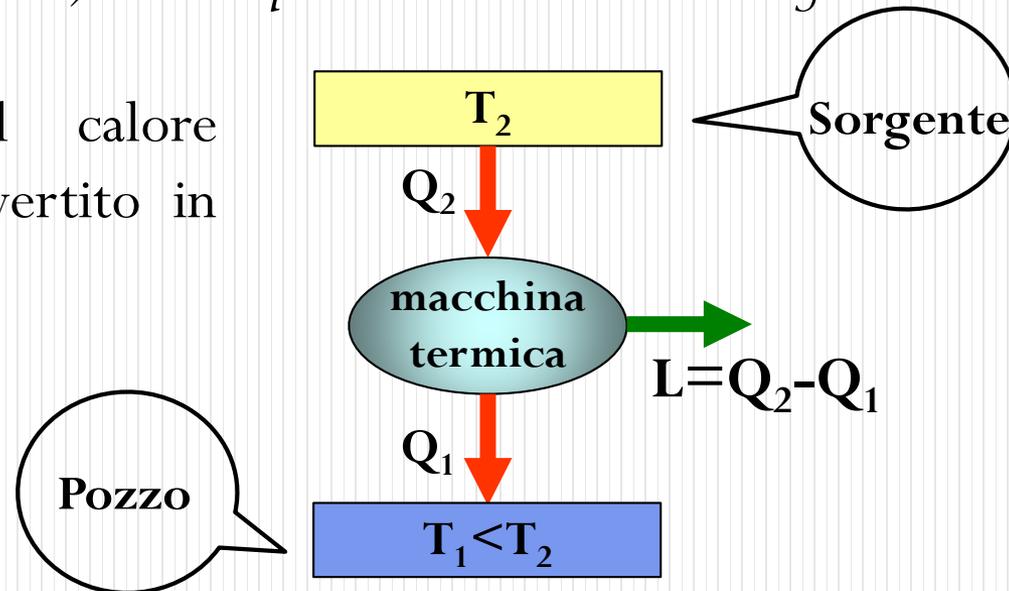
- *Il lavoro d'elica, convertito prima in energia interna all'acqua, finisce per essere ceduto sotto forma di calore all'ambiente circostante.*
- *Poiché è impossibile far ruotare l'elica fornendo calore all'acqua, ovvero convertire il calore in lavoro, è necessario l'utilizzo di **MOTORI TERMICI***

## Le macchine termiche

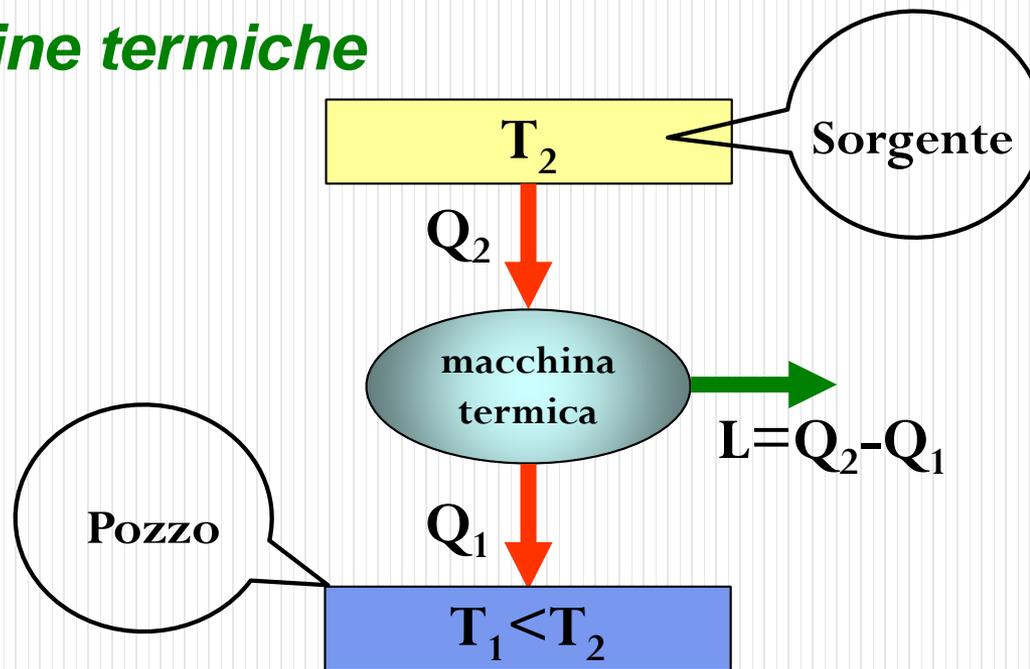
La **macchina termica** è un dispositivo capace di trasformare *in modo continuativo* in lavoro il calore assorbito da una sorgente.

Per funzionare, una macchina termica deve lavorare con almeno **due sorgenti di calore**: preleva calore dal serbatoio a temperatura maggiore (sorgente), mentre al serbatoio a temperatura minore (pozzo) cede la quantità di calore non trasformata in lavoro.

Quindi, parte del calore prelevato viene convertito in lavoro **L**



## Le macchine termiche



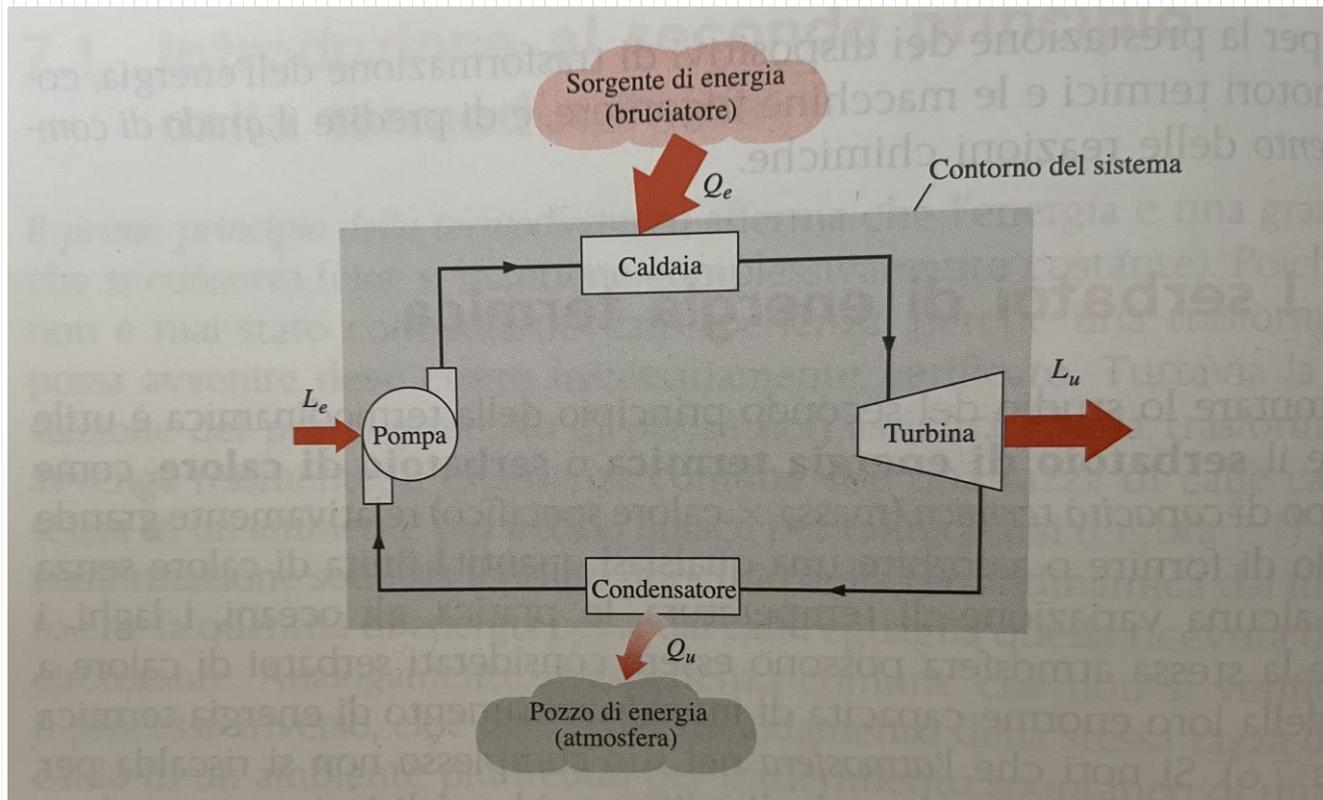
Il calore  $Q_2$  che il sistema assorbe dalla sorgente a temperatura maggiore solo in parte viene trasformato in lavoro  $L$ .

Il resto, cioè la quantità di calore  $Q_1$ , deve necessariamente essere ceduto al pozzo, e va quindi sprecato (**calore di scarto**).

$$L = Q_2 - Q_1$$

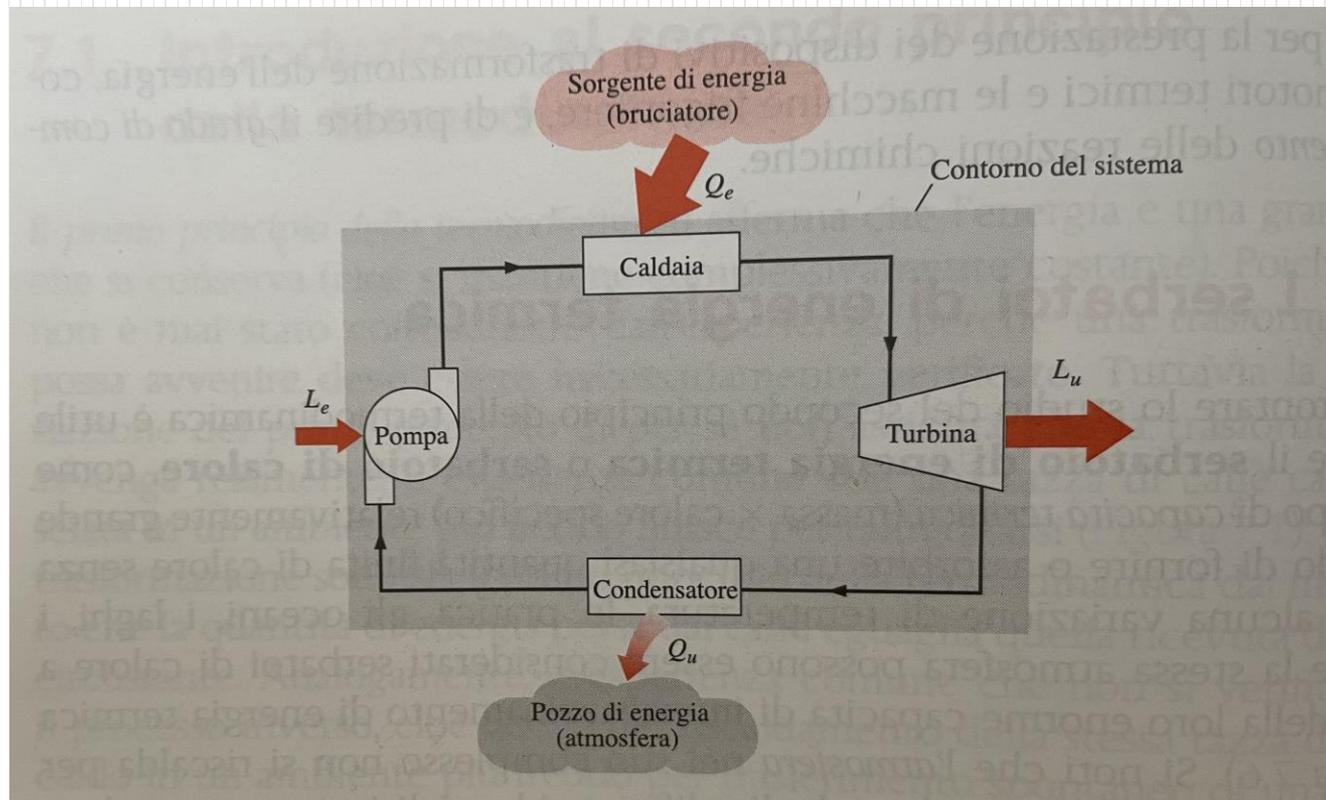
## Macchina termica

In una macchina termica si effettua un ciclo termodinamico. C'è un fluido evolvente al quale viene dato e dal quale viene trasferito calore per compiere il ciclo.



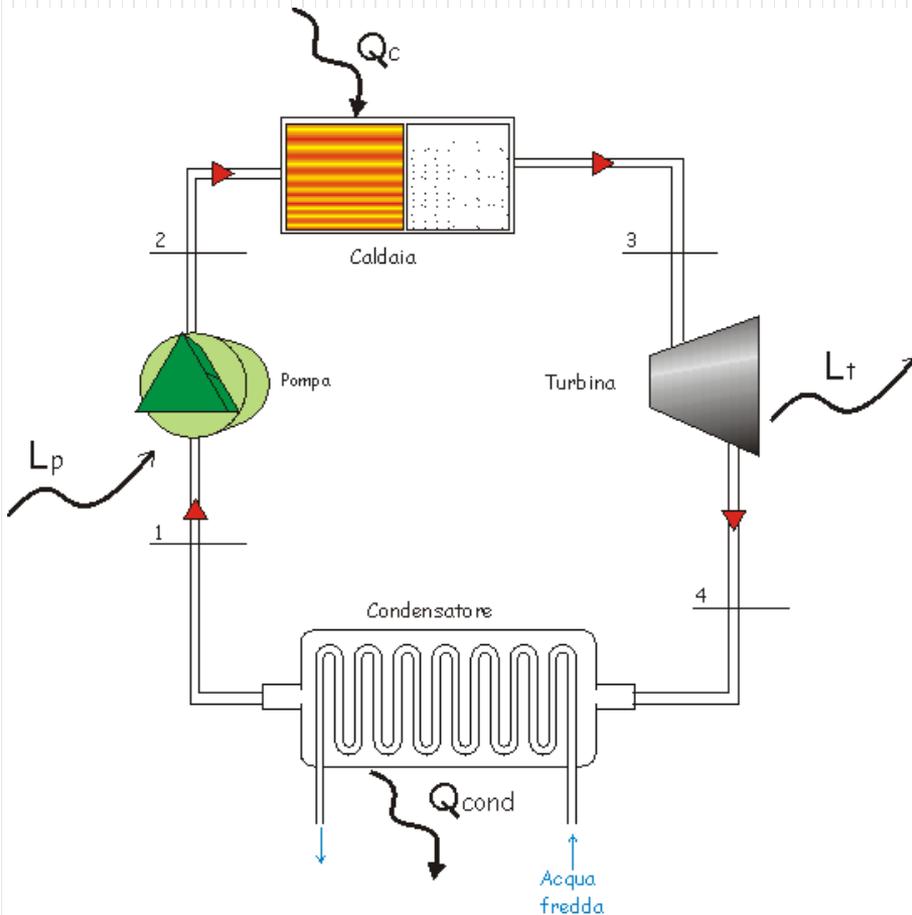
## Macchina termica

L'impianto a vapore è il classico esempio di macchina termica per la produzione di lavoro. In esso l'energia termica sviluppata dal processo di combustione viene trasferita al fluido evolvente sotto forma di calore.



## Rendimento di una macchina termica

In un impianto a vapore l'energia termica sviluppata dal processo di combustione viene trasferita al fluido evolvente sotto forma di calore.



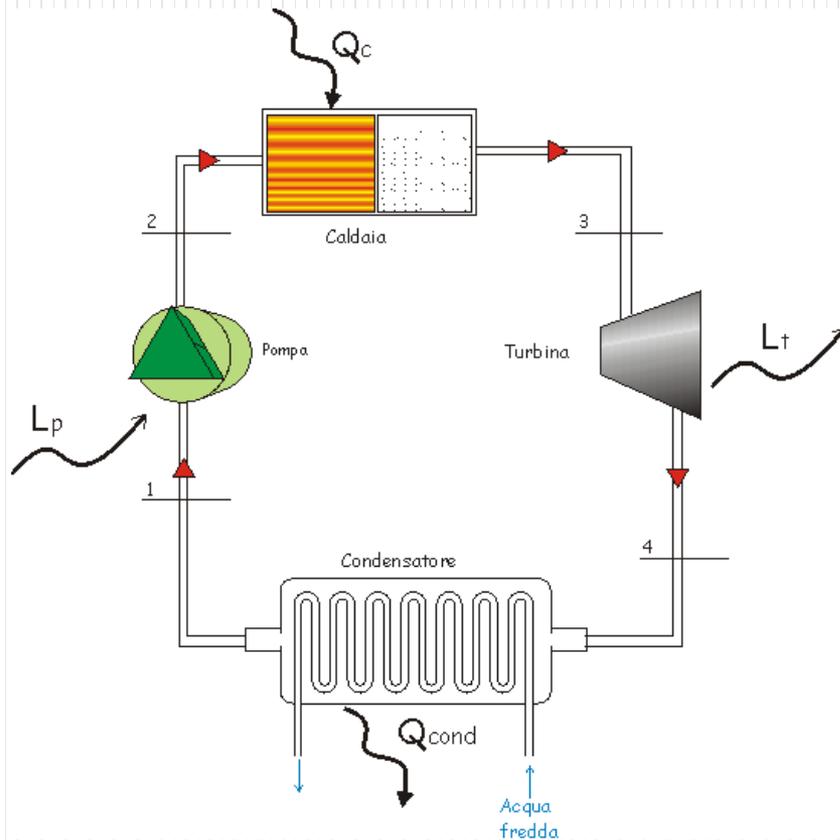
$Q_c$  = quantità di calore fornita dal fluido evolvente in caldaia da una sorgente ad alta temperatura (bruciatore);

$Q_{cond}$  = quantità di calore ceduta dal vapore nel condensatore al pozzo ad una temperatura più bassa;

$L_t$  = lavoro fornito dall'espansione del vapore in turbina;

$L_p$  = lavoro richiesto dalla pompa per portare l'acqua alla pressione di regime della caldaia.

## Il rendimento di una macchina termica



$$L_{\text{netto}} = L_{\text{turbina}} (\text{uscita}) - L_{\text{pompa}} (\text{entrata})$$

Poiché **in un ciclo termodinamico** la variazione di energia interna è nulla di ha:

$$\Delta U = Q - L$$

$$\Delta U = 0$$

$$Q - L = 0$$

$$Q = L$$

Quindi

$$L_{\text{netto}} = Q_{\text{netto}} =$$

$$= Q_{\text{caldaia}} (\text{entrata}) - Q_{\text{condensatore}} (\text{uscita})$$

## Il rendimento di una macchina termica

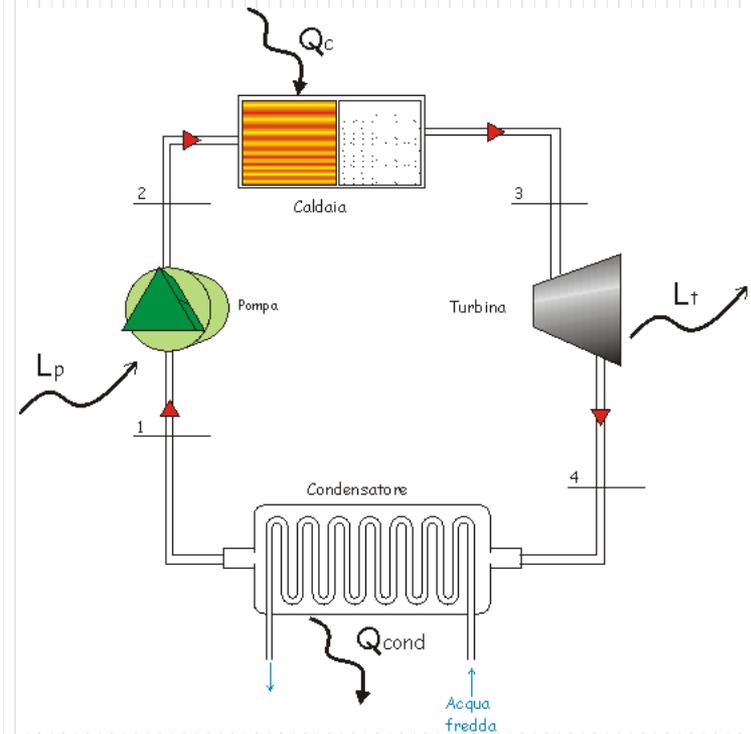
Il **rendimento termico** di una motore termico è definito come il rapporto tra il **lavoro prodotto** dalla macchina termica e il **calore assorbito** dal motore stesso.

$$\text{Efficienza} = \frac{\text{energia ottenuta}}{\text{energia fornita}} = \frac{\text{Lavoro netto}}{\text{Calore assorbito}}$$

$$\eta = \frac{L_{\text{netto}}}{Q_{\text{entrata}}} = \frac{L_{\text{netto}}}{Q_c}$$

$$\eta = \frac{L_{\text{netto}}}{Q_{\text{entrata}}} = \frac{Q_{\text{entrata}} - Q_{\text{uscita}}}{Q_{\text{entrata}}} = 1 - \frac{Q_{\text{uscita}}}{Q_{\text{entrata}}}$$

$$\eta = 1 - \frac{Q_{\text{uscita}}}{Q_{\text{entrata}}} = 1 - \frac{Q_{\text{cond}}}{Q_{\text{caldaia}}}$$



## *Rendimento Termico*

$$\eta = 1 - \frac{Q_{uscita}}{Q_{entrata}} = 1 - \frac{Q_{cond}}{Q_{caldaia}}$$

- È sempre minore dell'unità;
- È una misura dell'efficienza con il quale un motore termico riesce a convertire l'energia fornitagli sotto forma di calore in lavoro;
- Sono valori bassi (20% per motori benzina, 30% per motori diesel; 40% grandi impianti a vapore)

# *Macchine Frigorifere e PdC*

Il calore fluisce spontaneamente nel verso delle temperature decrescenti.

Il processo inverso non avviene spontaneamente ma solo attraverso l'uso di macchine speciali: Macchine Frigorifere o Pompe di Calore.

Un **ciclo inverso** è un ciclo termodinamico in grado di trasferire calore da un ambiente a bassa temperatura ad uno a temperatura superiore.

La macchina che compie un ciclo inverso può essere interpretata, e utilizzata come:

- **macchina frigorifera**, con lo scopo di sottrarre calore da un ambiente freddo trasferendolo ad uno caldo, raffreddando l'ambiente freddo, rispetto alle sue condizioni naturali, (questo effetto è quindi utilizzato nei frigoriferi e nei condizionatori d'aria).
- **pompa di calore** il cui scopo è fornire calore ad un ambiente caldo, prelevandolo da un ambiente più freddo.

# *Macchine Frigorifere e PdC*

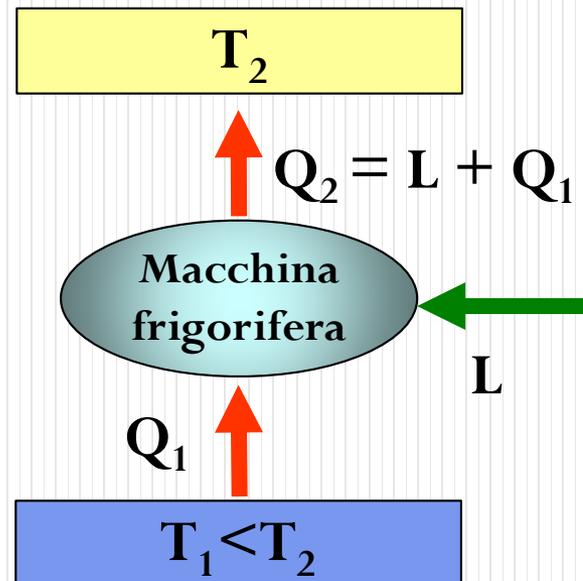
In ambedue gli utilizzi, occorre:

1. **assorbire un lavoro** per far funzionare il ciclo
2. **cedere calore all'ambiente caldo** del ciclo  
(effetto utile della macchina funzionante come pompa di calore)
3. **assorbire calore dall'ambiente più freddo**  
(effetto utile della macchina funzionante come frigorifero)

# Macchine Frigorifere e Pompe di Calore

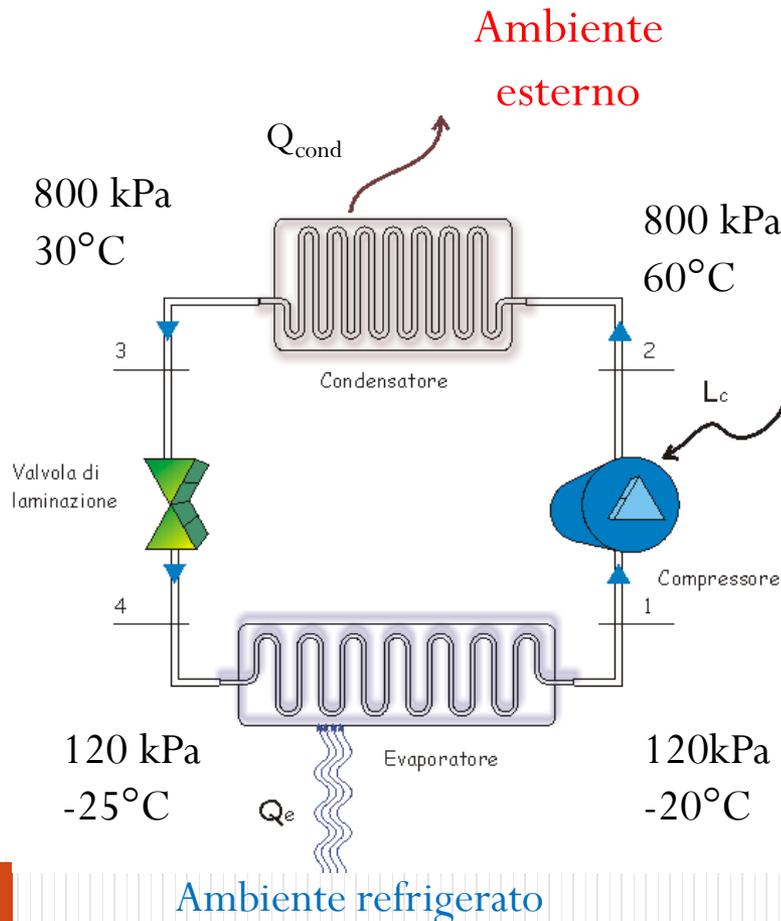
*Due sorgenti di calore: preleva calore dal serbatoio a temperatura minore (pozzo), mentre cede la quantità di calore al serbatoio a temperatura maggiore (sorgente).*

*Lavoro assorbito dall'esterno*



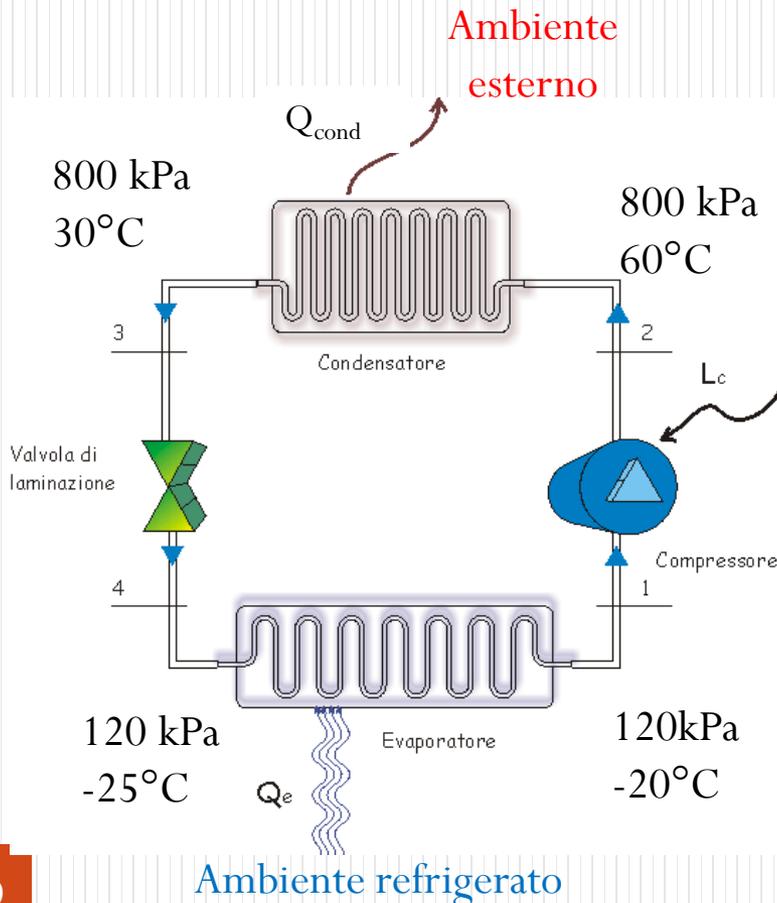
# Macchine Frigorifere e Pompe di Calore

Le macchine frigorifere operano secondo un ciclo termodinamico, impiegando un fluido refrigerante (*ciclo frigorifero a compressione di vapore*): Questo ciclo si realizza impiegando quattro componenti principali

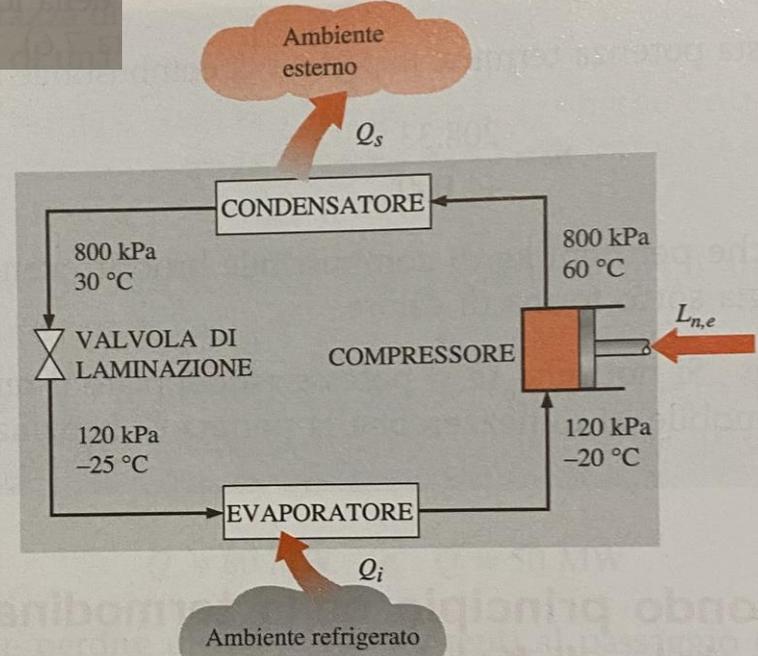
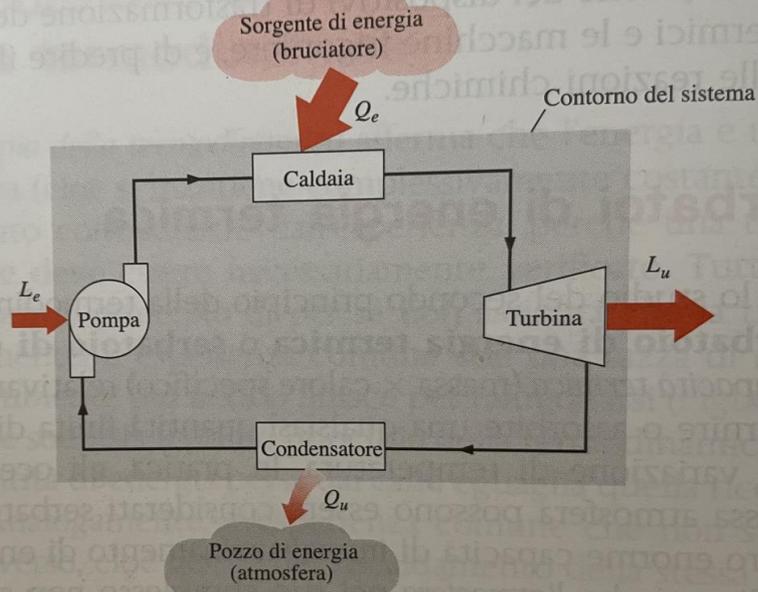


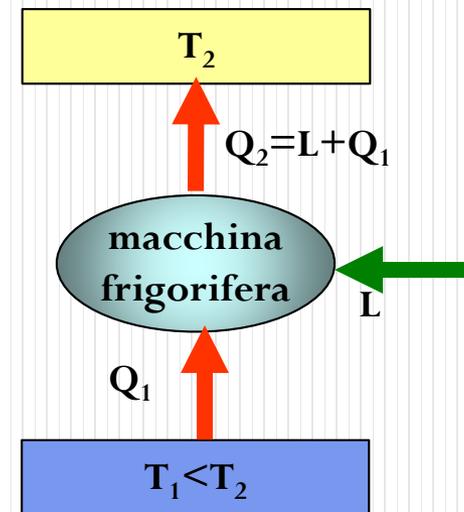
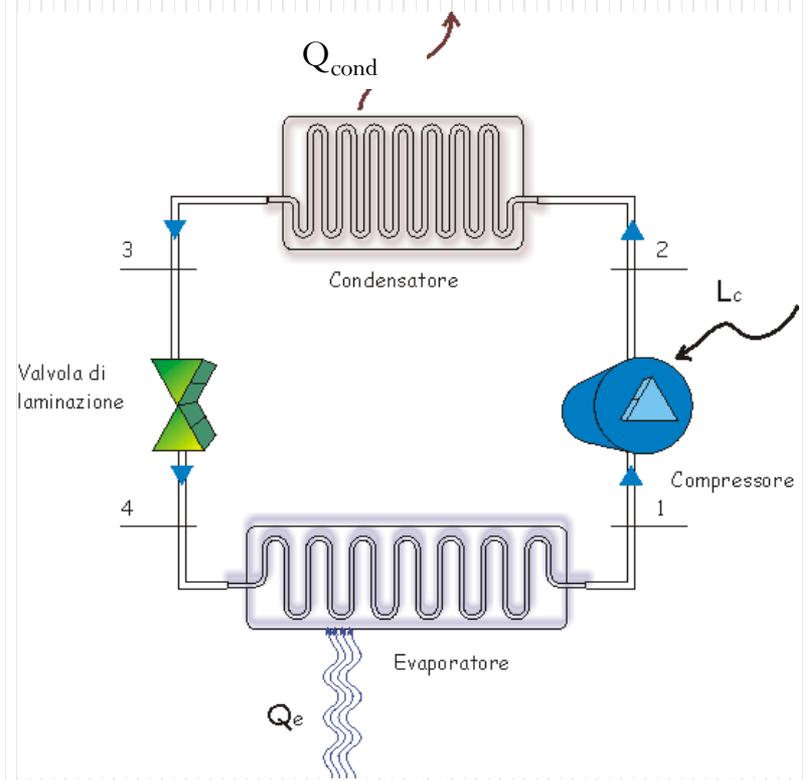
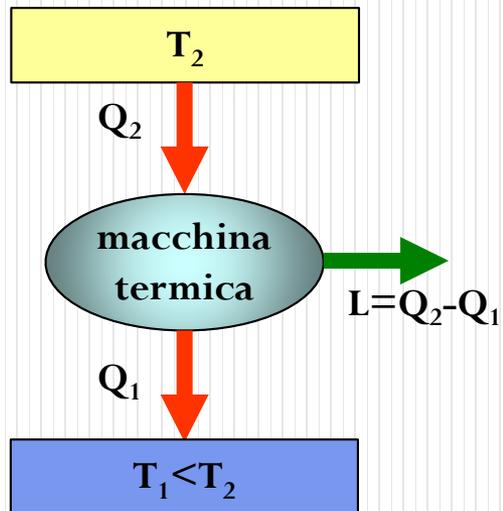
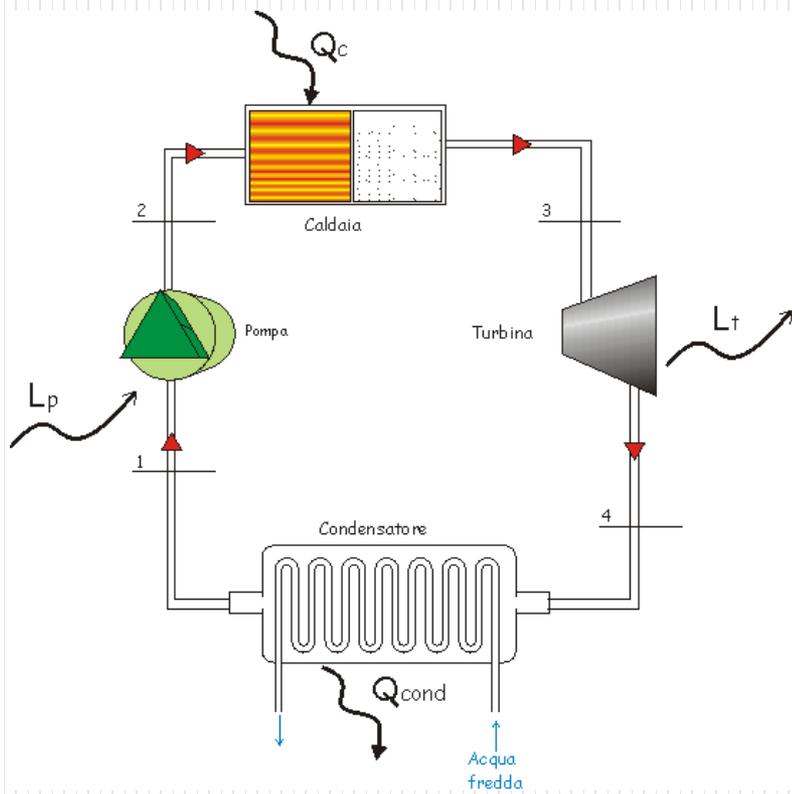
- 1-2. Compressore
- 2-3. Condensatore
- 3-4. Valvola di laminazione
- 4-1. Evaporatore

# Macchine Frigorifere e Pompe di Calore



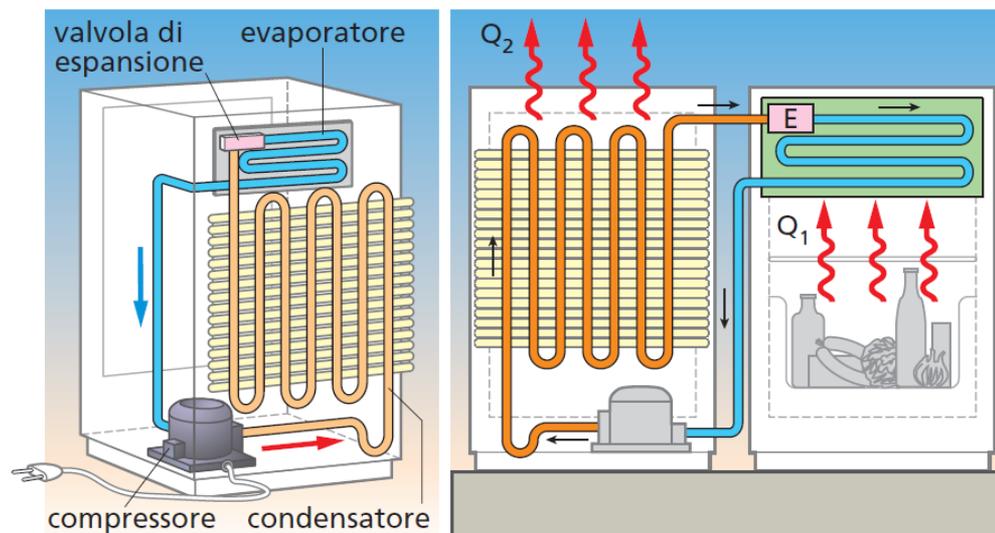
1. Il refrigerante entra nel **compressore** allo stato di vapore e viene compresso ( $L_c$ ) fino alla pressione  $p_2$  di ingresso del condensatore. La temperatura  $T_2$  di uscita dal compressore è alta.
2. Il refrigerante giunge nel condensatore, condensa cedendo calore all'ambiente ( $Q_c$ ).
3. Il refrigerante, sempre in fase liquida, giunge nella valvola di laminazione, dove subisce una rilevante riduzione di pressione ( $p_4 \ll p_3$ ) e temperatura ( $T_4 \ll T_3$ )
4. Infine, passa nell'evaporatore, dove evapora assorbendo calore dall'ambiente refrigerato ( $Q_e$ ).





# Il Frigorifero

Il frigorifero è costituito da un ambiente chiuso da raffreddare e da una serpentina dentro al quale circola del vapore.

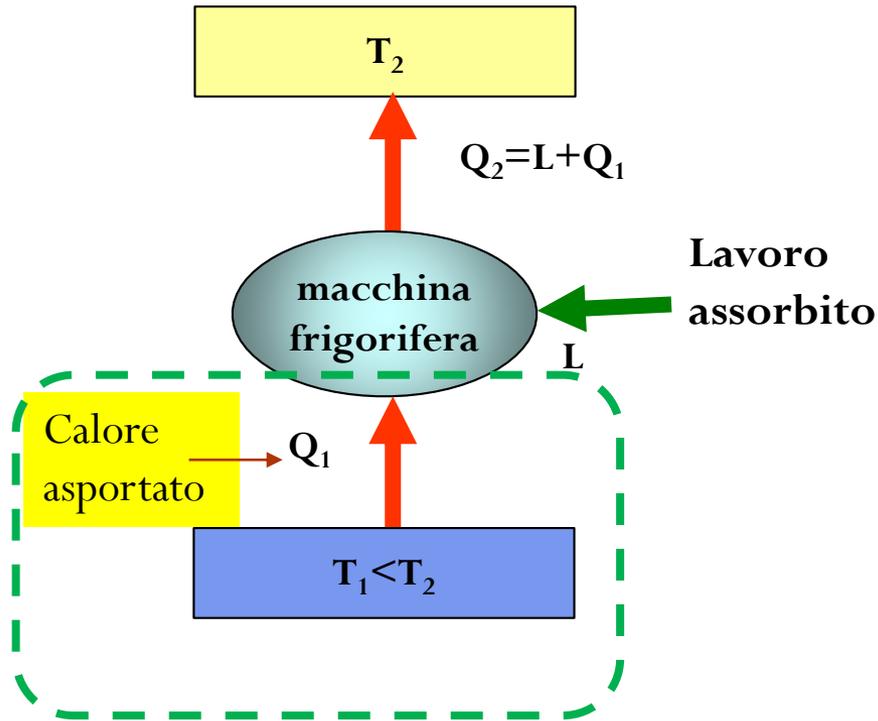


- La serpentina è collegata a un compressore.
- All'esterno del frigorifero, il compressore comprime il vapore fino a farlo liquefare nel condensatore; questo processo tende ad aumentare la temperatura del fluido.
- La serpentina esterna (in arancione nella figura) permette il passaggio di calore dal fluido all'ambiente in cui il frigorifero si trova.
- Quando il liquido passa attraverso la valvola di espansione ed entra all'interno del frigorifero, ritorna allo stato di vapore. In questo processo assorbe energia dall'interno del frigorifero, che si raffredda. La serpentina interna (in verde nella figura) permette il passaggio di calore dall'interno del frigorifero al fluido.
- Il vapore torna all'esterno, viene compresso di nuovo e il ciclo si ripete

# Efficienza di una Macchina Frigorifera

L'efficienza di una macchina frigorifera viene espressa in termini di **COP** (Coefficiente di Prestazione).

**L'obiettivo di una MF** è quello di mantenere bassa la temperatura dell'ambiente da refrigerare asportandone il calore e scaricandolo ad un pozzo a più alta temperatura



- $Q_1$  è la quantità di calore asportata dall'ambiente da refrigerare alla temperatura  $T_1 < T_2$
- $Q_2$  è la quantità di calore ceduto all'ambiente caldo a temperatura  $T_2 > T_1$ .
- $L$  è il lavoro fornito al compressore

$$COP_F = \frac{\text{calore asportato}}{\text{lavoro assorbito}} = \frac{Q_1}{L}$$

$$COP_F = \frac{Q_1}{L} = \frac{Q_1}{Q_2 - Q_1} = \frac{1}{\frac{Q_2}{Q_1} - 1}$$

## Efficienza di una Macchina Frigorifera

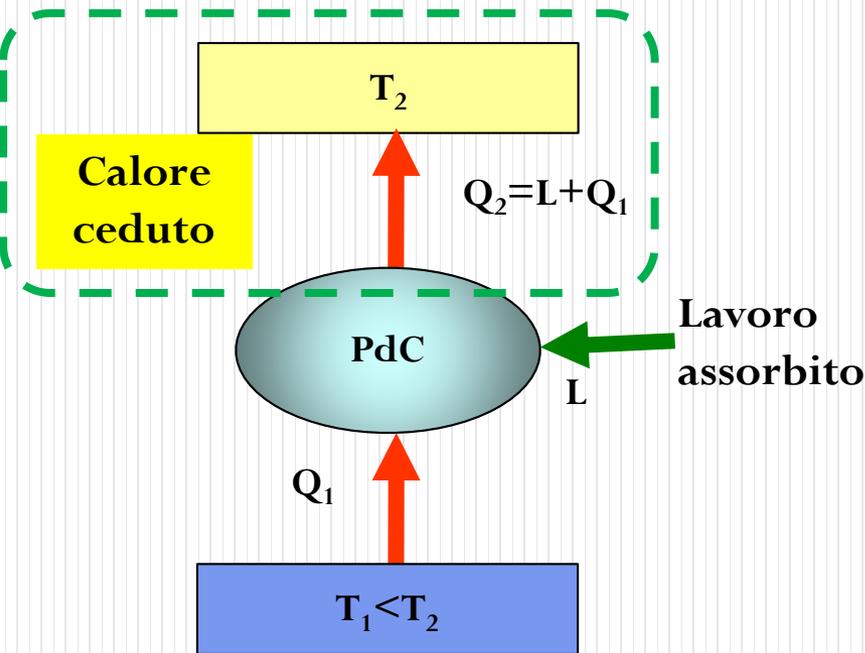
$$COP_F = \frac{\text{calore asportato}}{\text{lavoro assorbito}} = \frac{Q_1}{L}$$

$$COP_F = \frac{Q_1}{L} = \frac{Q_1}{Q_2 - Q_1} = \frac{1}{\frac{Q_2}{Q_1} - 1}$$

Il  $COP_F$  può risultare maggiore dell'unità. Ciò significa che  $Q_1$ , ossia il calore asportato dall'ambiente da refrigerare, può essere superiore al lavoro speso  $L$

## Efficienza di una *Pompa di Calore*

L'obiettivo di una pompa di calore è quello di mantenere caldo l'ambiente a più alta temperatura fornendo il calore assorbito da una sorgente a più bassa temperatura



- $Q_1$  è la quantità di calore asportata dall'ambiente da refrigerare alla temperatura  $T_1$ ,
- $Q_2$  è la quantità di calore ceduta all'ambiente caldo a temperatura  $T_2 > T_1$ .
- $L$  è il lavoro fornito al compressore

$$COP_{PdC} = \frac{\text{calore ceduto}}{\text{lavoro assorbito}} = \frac{Q_2}{L}$$

$$COP_{PdC} = \frac{Q_2}{Q_2 - Q_1} = \frac{1}{1 - \frac{Q_1}{Q_2}}$$

## Efficienza di una Pompa di Calore

$$COP_{PdC} = \frac{\text{calore ceduto}}{\text{lavoro assorbito}} = \frac{Q_2}{L}$$

$$COP_{PdC} = \frac{Q_2}{Q_2 - Q_1} = \frac{1}{1 - \frac{Q_1}{Q_2}}$$

## *Efficienza di una Pompa di Calore*

$$COP_F = \frac{Q_1}{L} = \frac{Q_1}{Q_2 - Q_1} = \frac{1}{\frac{Q_2}{Q_1} - 1}$$

Dal confronto tra  $COP_F$  e  $COP_{PdC}$  risulta:

$$COP_{PdC} = COP_F + 1$$

## ***Il secondo principio della termodinamica***

Mentre la trasformazione di lavoro in calore è sempre possibile (per esempio, le forze d'attrito fanno proprio questo), **il processo inverso è possibile solo se vengono rispettate alcune condizioni, stabilite dal secondo principio della termodinamica, una legge che si può esprimere in modi diversi.**

**I due più noti enunciati di tale principio sono quelli di Kelvin e di Clausius.**

### **ENUNCIATO DI KELVIN-PLANK**

Per qualsiasi apparecchiatura che operi secondo un ciclo è impossibile ricevere calore da **una sola sorgente** e produrre una quantità di lavoro utile

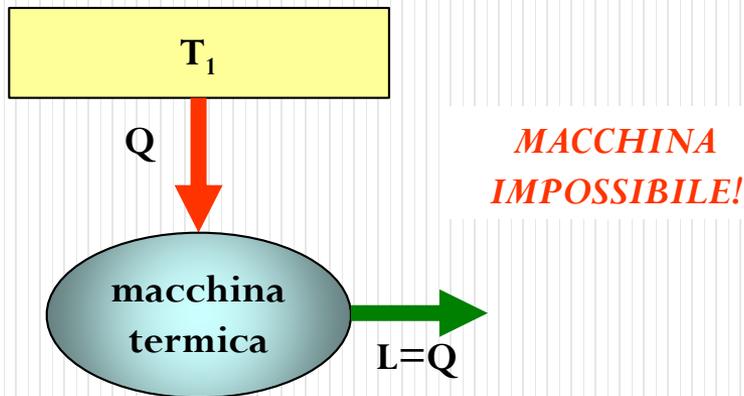
### **ENUNCIATO DI CLAUDIUS**

È impossibile realizzare una macchina con funzionamento ciclico il cui *unico* effetto sia il trasferimento di calore **da un corpo a bassa temperatura ad un altro a temperatura maggiore.**

*I diversi enunciati del secondo principio della termodinamica sono tutti **equivalenti** tra loro*

## ENUNCIATO DI KELVIN-PLANK

Per qualsiasi apparecchiatura che operi secondo un ciclo è impossibile ricevere calore da una sola sorgente e produrre solo una quantità di lavoro utile



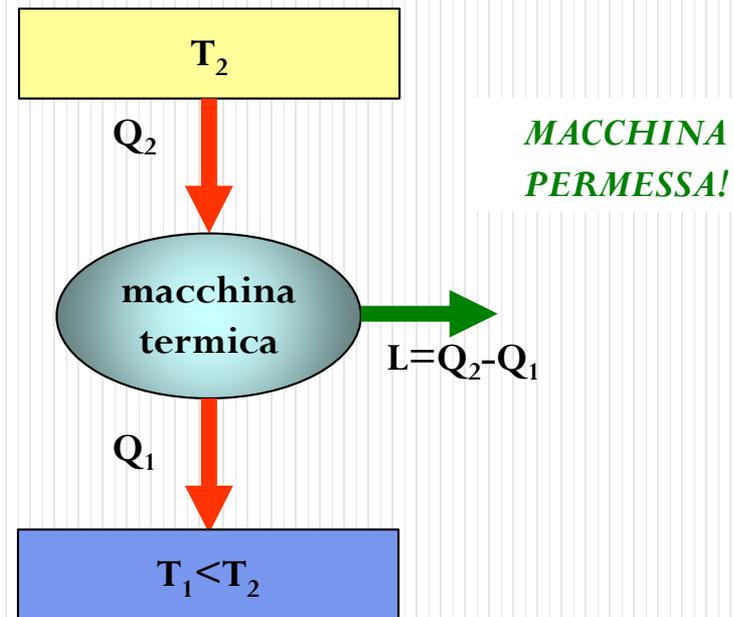
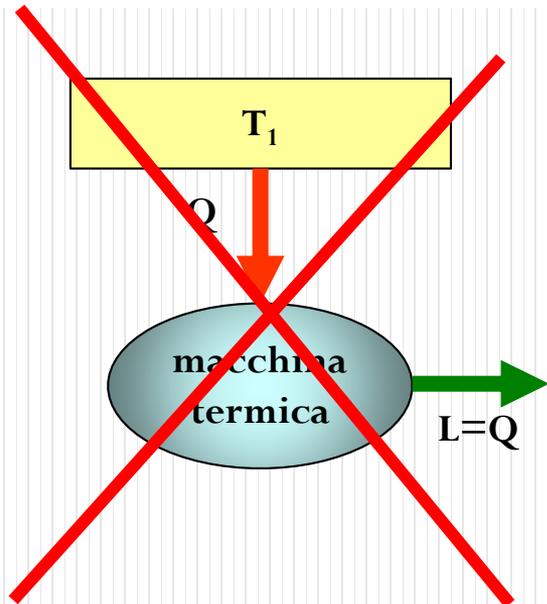
Non è possibile realizzare una macchina termica ciclica come quella schematizzata in figura, cioè una macchina che abbia come unico effetto la totale trasformazione in lavoro  $L$  del calore  $Q$  assorbito da un'unica sorgente.

*Una tale macchina violerebbe l'enunciato di Kelvin del secondo principio della termodinamica.*

## ENUNCIATO DI KELVIN-PLANK

Per funzionare ciclicamente, la macchina assorbe calore da una sorgente a temperatura maggiore e ne cede una parte ad una sorgente a temperatura minore.

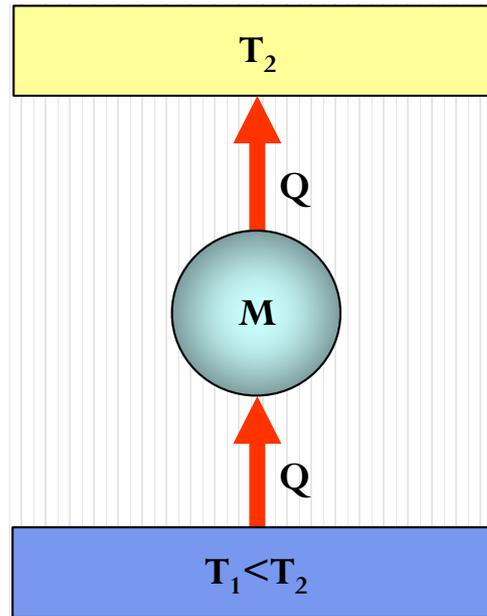
La differenza tra l'energia assorbita e quella ceduta è uguale al lavoro utile compiuto dalla macchina.



## ENUNCIATO DI CLAUDIUS

È **impossibile** realizzare una macchina con funzionamento ciclico il cui *unico* effetto sia il trasferimento di calore da un corpo a più bassa temperatura ad un altro a temperatura maggiore.

Una tale macchina violerebbe l'enunciato di Clausius del secondo principio della termodinamica.



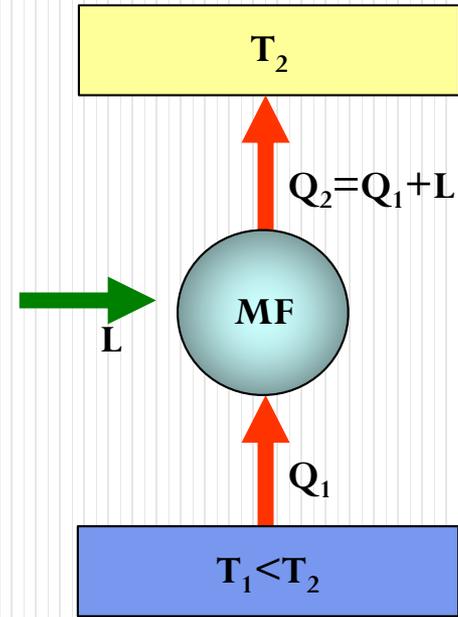
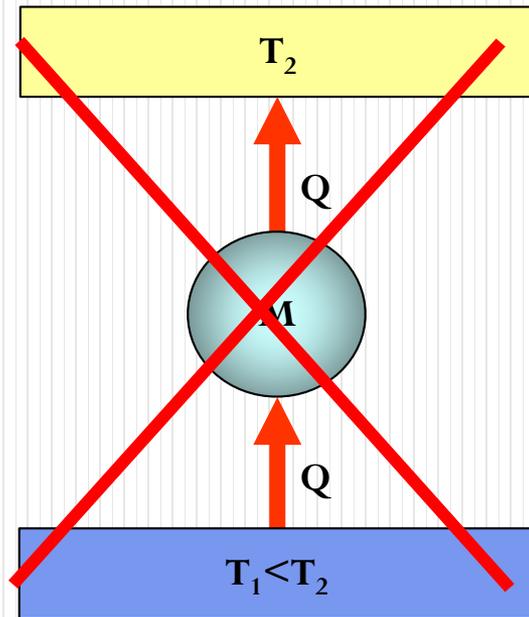
**MACCHINA IMPOSSIBILE!**

Non è possibile realizzare una macchina ciclica come quella schematizzata in figura, cioè una macchina che abbia come unico effetto il passaggio di una certa quantità di calore  $Q$  da un serbatoio meno caldo ad uno più caldo.

## ENUNCIATO DI CLAUDIUS

È impossibile realizzare una macchina con funzionamento ciclico il cui *unico* effetto sia il trasferimento di calore da un corpo a bassa temperatura ad un altro a temperatura maggiore.

Il trasferimento di calore da un corpo più freddo ad uno più caldo può realizzarsi solo impiegando una macchina termica (macchina frigorifera o pompa di calore)



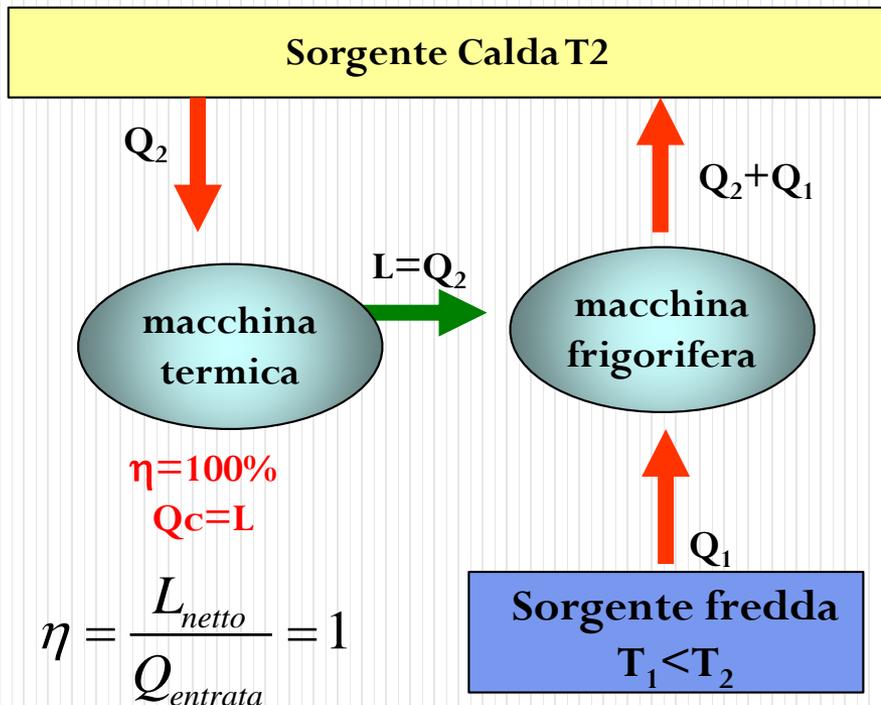
**MACCHINA  
PERMESSA!**

Un passaggio di calore da un corpo più freddo ad uno più caldo **può essere realizzato mediante una macchina a ciclo inverso che assorbe lavoro dall'ambiente esterno.**

# EQUIVALENZA DEI DUE ENUNCIATI

OGNI MACCHINA CHE DOVESSE VIOLARE IL 2° PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA SECONDO L'ENUNCIATO DI KELVIN-PLANK LO VIOLEREBBE ANCHE SECONDO CLAUDIUS, E VICEVERSA

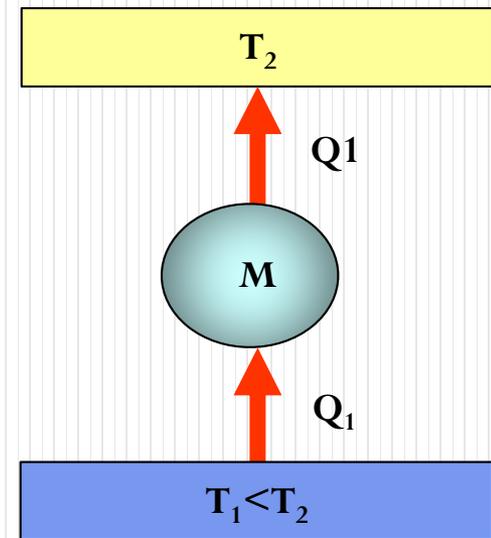
Se l'enunciato di Kelvin-Plank fosse falso, allora potrebbe esistere una macchina termica con un rendimento del 100%



Si fornisca il lavoro  $L = Q_2$  ad una macchina frigorifera che assorbe una quantità di calore pari a  $Q_1$  dal serbatoio a bassa  $T_1$ , scartando quindi una quantità di calore pari a  $Q_2 + Q_1$

In totale durante questo processo la sorgente  $T_2$  riceve una quantità netta di calore pari a:

$$(Q_2 + Q_1) - Q_2 = Q_1$$



Ottenendo quindi una macchina che viola l'enunciato di Clausius

# TRASFORMAZIONI REVERSIBILI ED IRREVERSIBILI

Una trasformazione **reversibile** è una **trasformazione ideale** nella quale gli effetti dissipativi (attriti, anelasticità, ecc.) sono nulli e gli scambi di energia avvengono per effetto di squilibri (quali differenze di temperatura) **infinitesimi**, in modo tale che la trasformazione possa essere percorsa sia in un verso che nel verso opposto.

*Una trasformazione è reversibile quando, può essere percorsa in senso inverso senza che ne resti traccia né nel sistema né nell'ambiente circostante.*

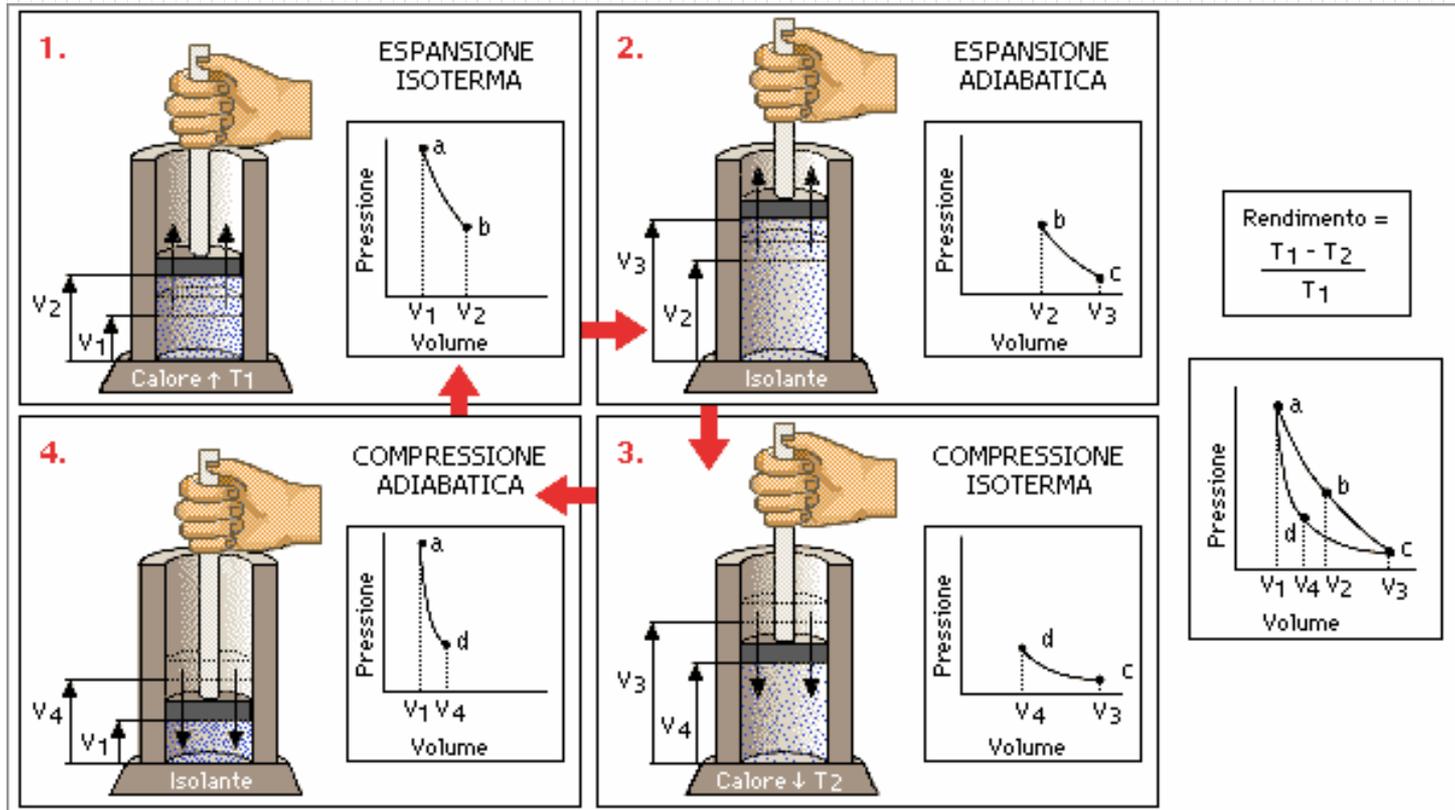
Nella **realtà** ci si può solo avvicinare a tale processo ideale senza però mai realizzarlo completamente. Le cause che rendono le trasformazioni reali **trasformazioni irreversibili** appaiono evidenti in conseguenza del secondo principio.

Tutte le trasformazioni che avvengono in natura sono **irreversibili**. Per esempio:

- **Attrito**
- **Scambio termico per salto finito di temperatura**

# Il Ciclo di Carnot

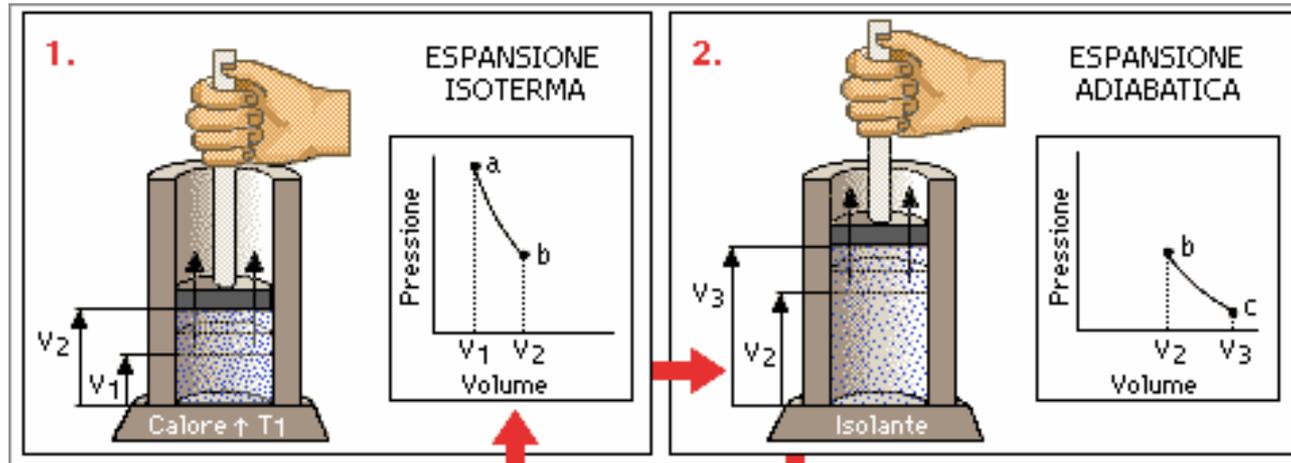
La macchina di Carnot rappresenta una **macchina termodinamica "ideale"** capace, operando fra due sorgenti di calore (termostati), di produrre lavoro meccanico con il massimo rendimento.



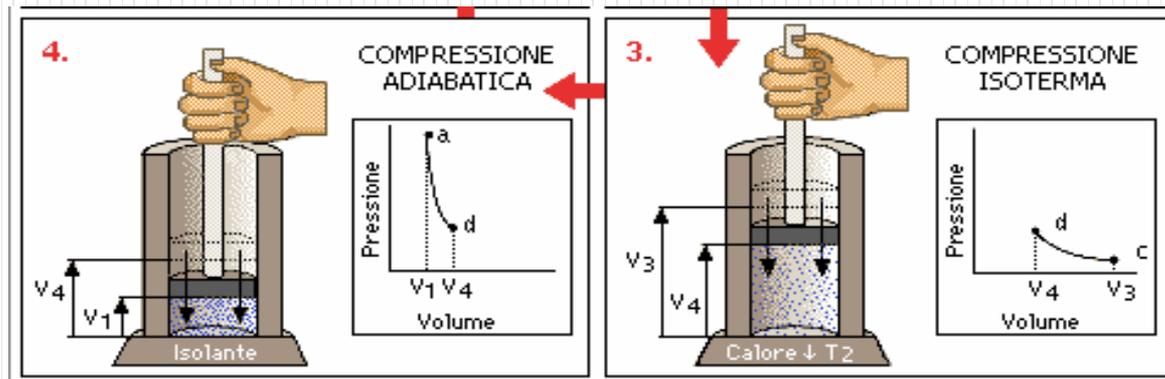
# Il Ciclo di Carnot

Durante la I fase (**espansione isoterma reversibile**), il sistema è posto in contatto con una sorgente a temperatura  $T_1$  : si espande e assorbe calore dalla sorgente, mantenendo perciò la sua temperatura costante.

Durante la fase II (**espansione adiabatica reversibile**) il sistema è isolato e non può scambiare calore con l'esterno: espandendosi, si raffredda fino alla temperatura  $T_2$ .



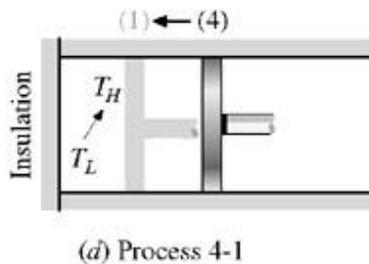
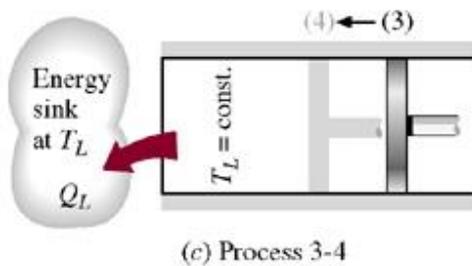
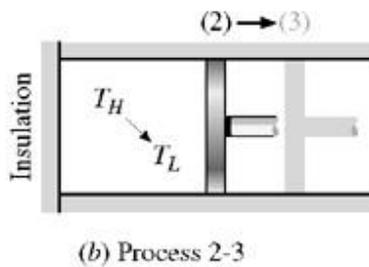
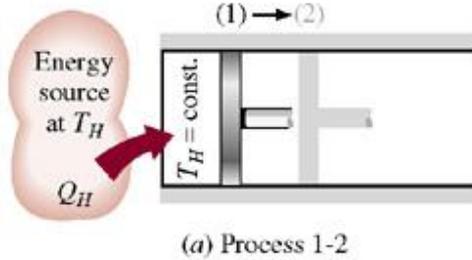
# Il Ciclo di Carnot



Nella fase III (**compressione isoterma reversibile**) il sistema è posto in contatto con una sorgente a temperatura  $T_2$  (più fredda di  $T_1$ ): mentre viene compresso, cede calore per mantenere costante la sua temperatura.

La IV fase (**compressione adiabatica reversibile**), in cui il sistema è nuovamente isolato dall'esterno, chiude il ciclo: il sistema subisce una compressione e, non potendo cedere calore all'esterno, innalza la sua temperatura al valore iniziale  $T_1$

# Il Ciclo di Carnot

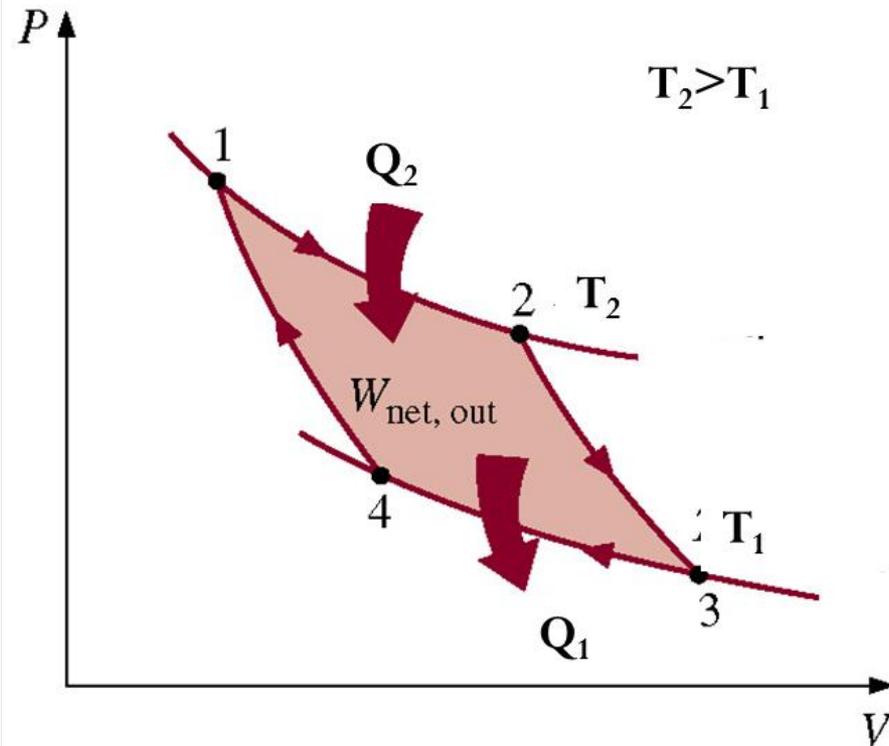


Fase 1-2: **espansione isoterma reversibile**  
( $Q_2$  assorbito) - high

Fase 2-3: **espansione adiabatica reversibile**

Fase 3-4: **compressione isoterma reversibile**  
( $Q_1$  ceduto) - low

Fase 4-1: **compressione adiabatica reversibile**



# Teoremi di Carnot

## 1° Teorema di Carnot

Il rendimento di un motore termico irreversibile **è sempre inferiore** a quello di un motore termico reversibile che operi tra le due stesse riserve di calore

## 2° Teorema di Carnot

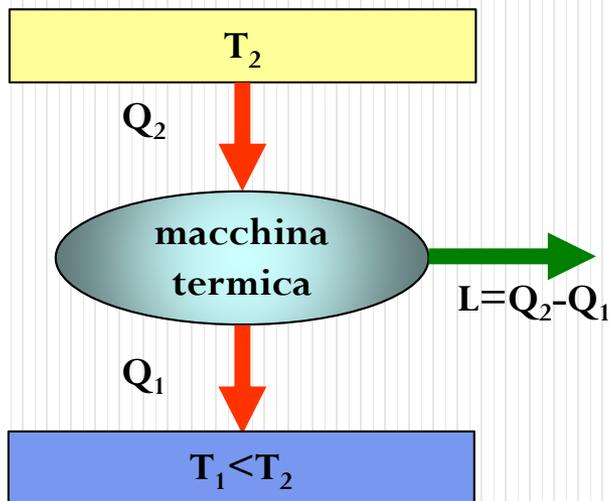
I rendimenti di **tutti i motori** termici reversibili che operino tra le due stesse riserve di calore **sono gli stessi**.

## Il Ciclo di Carnot diretto

Per il 2° teorema di Carnot si ha che il rendimento dei motori termici reversibili dipende dalle caratteristiche dei serbatoi di calore **indipendentemente dal ciclo seguito e dalle caratteristiche del fluido evolvente**. Pertanto, caratteristica peculiare di tale macchina è che il suo rendimento **dipenda soltanto dalle temperature delle due sorgenti** con le quali questa scambi calore.



Per i cicli reversibili il rapporto tra le energie scambiate sotto forma di calore può essere sostituito con il rapporto delle temperature termodinamiche ovvero:  **$Q_2/Q_1 = T_2/T_1$**



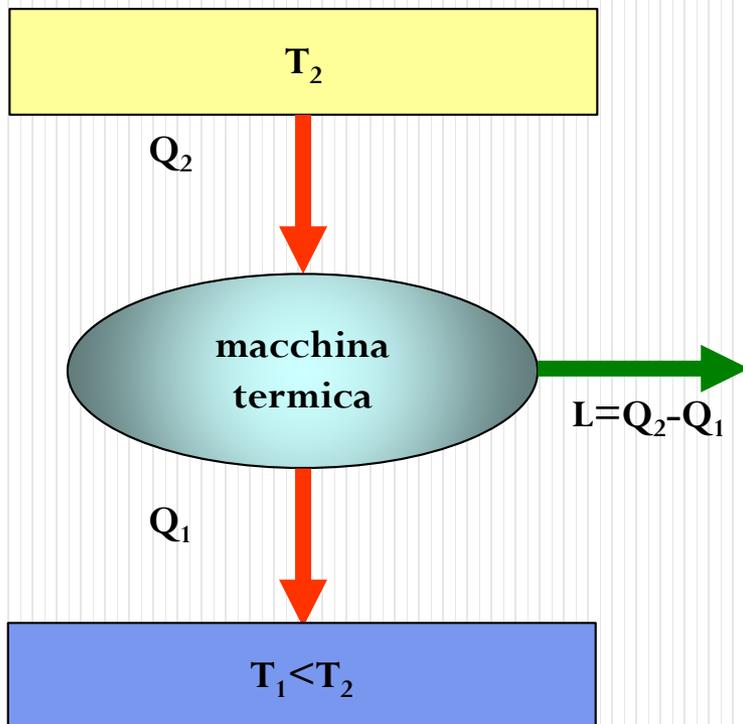
$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{Q_1}{Q_2} \quad \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

## Il teorema di Carnot

**Nessuna macchina che lavori tra due livelli di temperature può avere un rendimento superiore a quello di una macchina di Carnot che lavori tra le medesime temperature.**

Questo risultato, a cui pervenne Carnot intorno al 1825, è noto come teorema di Carnot. Per questo teorema sarà sempre:



$$\eta_{reale} \leq \eta_{Carnot}$$

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

# Il Ciclo Inverso di Carnot

Poiché il Ciclo di Carnot è reversibile, tutte le trasformazioni che esso comprende possono essere invertite, ottenendo il **Ciclo Inverso di Carnot**. Oltre al **verso delle trasformazioni**, cambia anche il **verso del calore e del lavoro** che si scambiano con l'esterno.

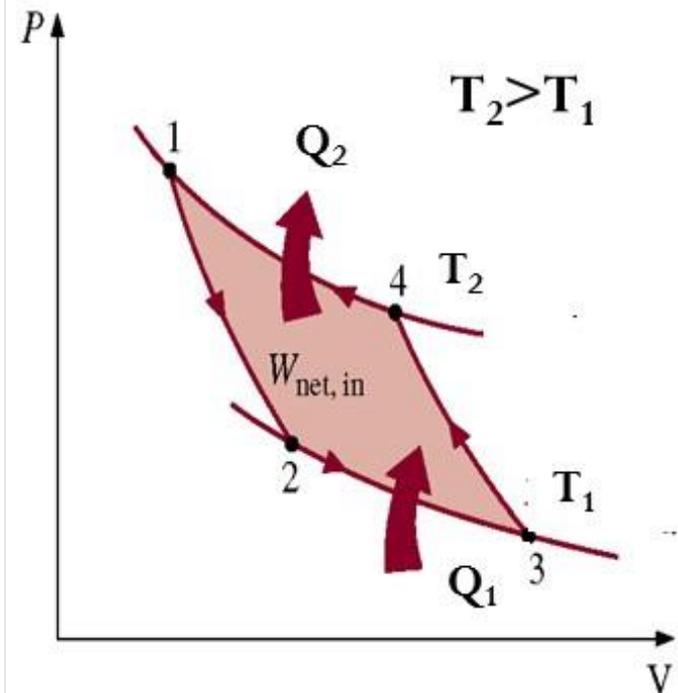
Fase 1-2: **espansione adiabatica reversibile**

Fase 2-3: **espansione isoterma reversibile**  
( $Q_1$ )

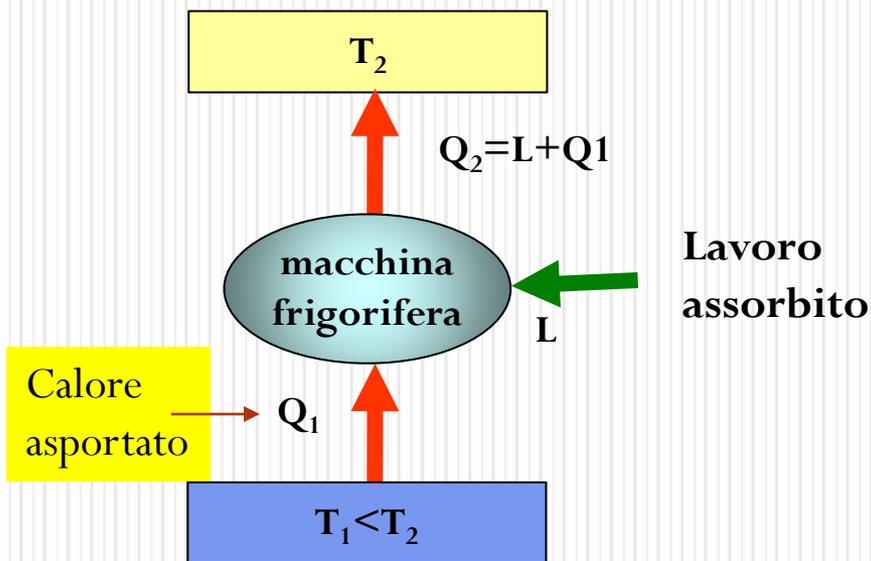
Fase 3-4 : **compressione adiabatica reversibile**

Fase 4-1 : **compressione isoterma reversibile**  
( $Q_2$ )

Rispetto al ciclo diretto, la sorgente a temperatura maggiore  $T_2$ , riceve calore, mentre quella a temperatura minore  $T_1$ , lo cede

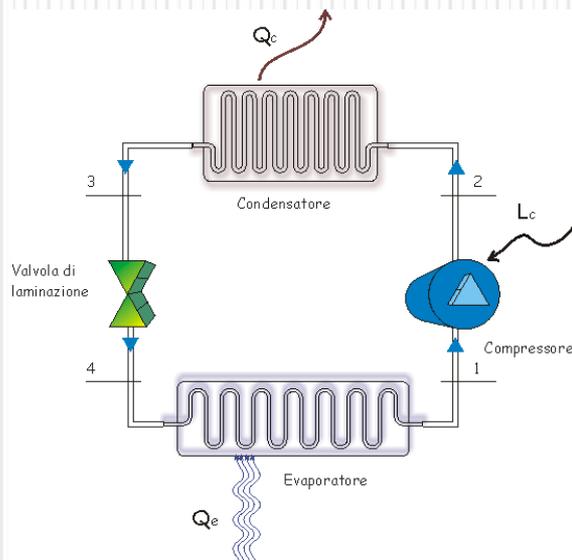


## Il Ciclo di Carnot inverso: macchina frigorifera

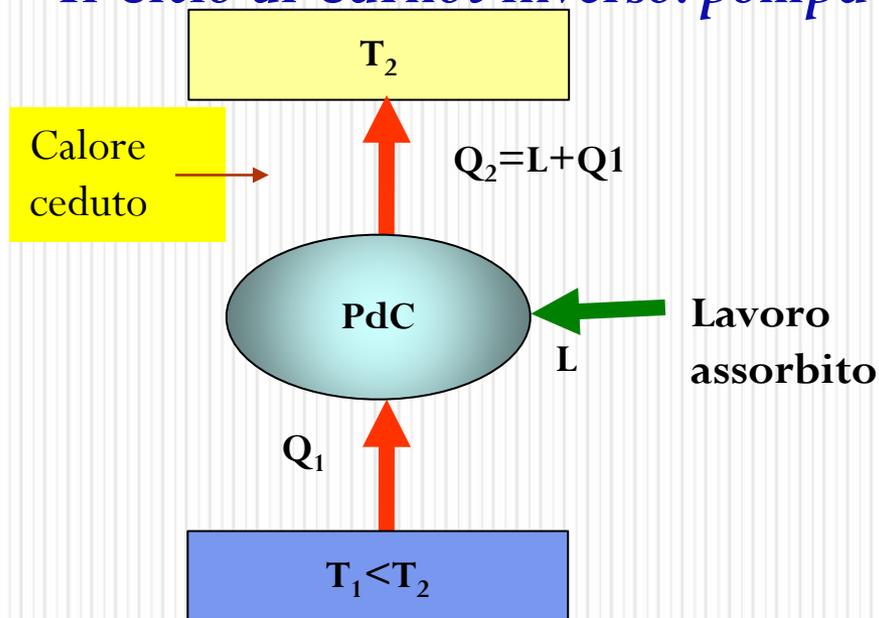


$$COP_F = \frac{Q_1}{L} = \frac{Q_1}{Q_2 - Q_1} = \frac{1}{\frac{Q_2}{Q_1} - 1}$$

$$COP_{F, Carnot} = \frac{T_1}{L} = \frac{T_1}{T_2 - T_1} = \frac{1}{\frac{T_2}{T_1} - 1}$$



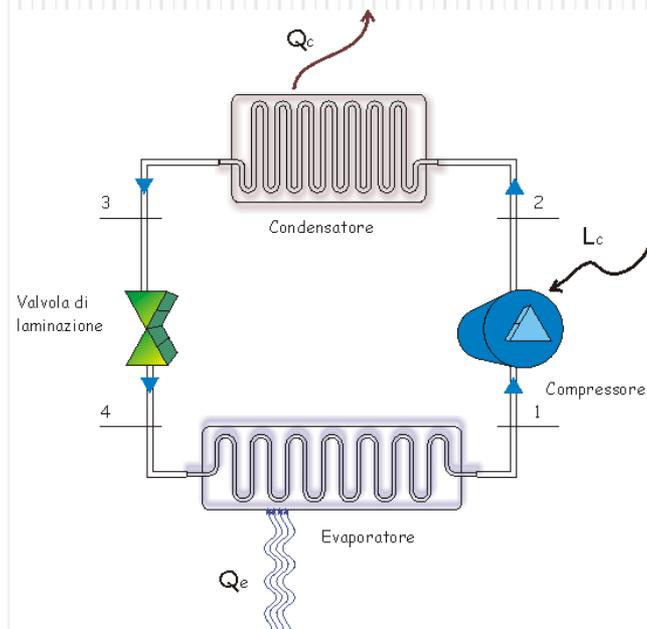
## Il Ciclo di Carnot inverso: pompa di calore

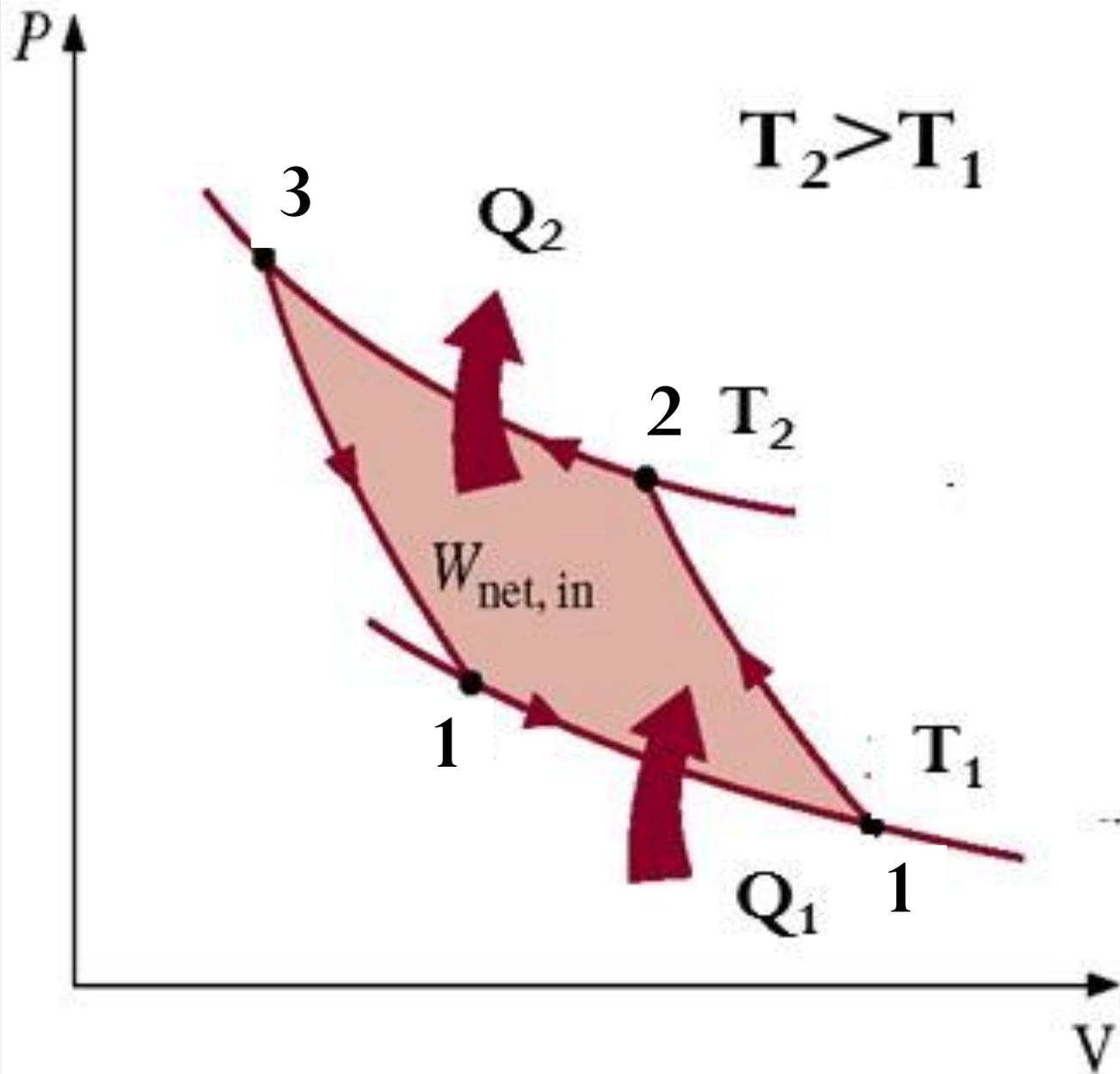


Q2

$$COP_{PdC} = \frac{Q_2}{L} = \frac{Q_2}{Q_2 - Q_1} = \frac{1}{1 - \frac{Q_1}{Q_2}}$$

$$COP_{PdC, Carnot} = \frac{T_2}{L} = \frac{T_2}{T_2 - T_1} = \frac{1}{1 - \frac{T_1}{T_2}}$$





## Efficienza

Per capire quanto un motore reale sia vicino alla macchina termica ideale corrispondente, si ricorre al concetto di efficienza o **di rendimento di secondo principio o rendimento isoentropico**, definita come il rapporto tra il rendimento della macchina reale e quello della macchina ideale

$$\varepsilon = \frac{\eta}{\eta_{rev}}$$

# L'entropia

Storicamente il concetto di **entropia** fu introdotto per la prima volta da **Clausius** nel 1865.

**L'entropia S (J/K)**, indicata con **s (J/kg K)** se riferita all'unità di massa, è, insieme all'energia interna U e all'entalpia H, **una funzioni di stato di stato**. Per ogni processo reversibile:

$$\delta Q = Tds \quad \text{ovvero} \quad Q = T\Delta S$$

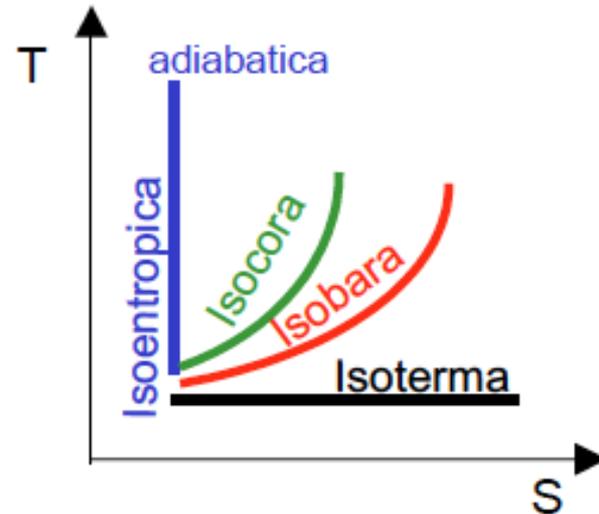
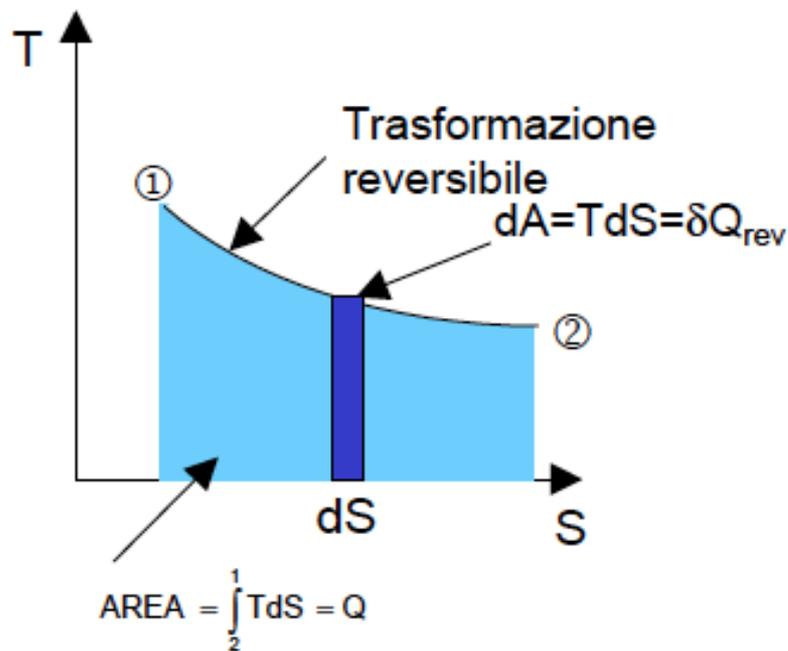
**Nei processi reversibili di un sistema isolato o adiabatico la produzione di entropia è uguale a 0.**

**Nei processi irreversibili l'entropia di un sistema isolato aumenta sempre.**

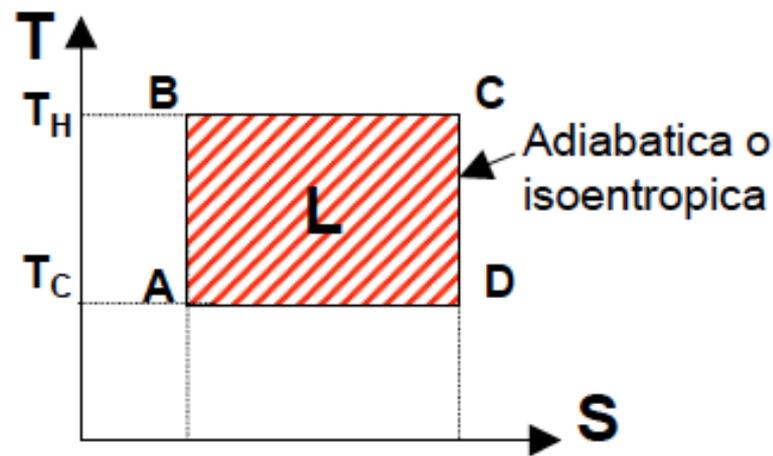
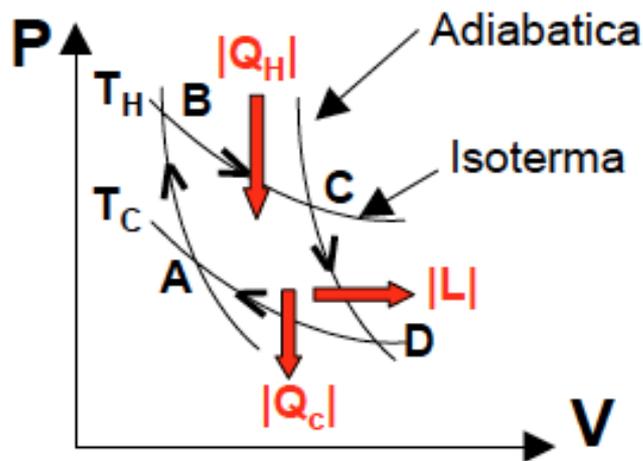
Ciò che interessa conoscere di un sistema è la variazione di entropia fra due stati, non il valore della sua entropia in un certo stato.

L'entropia è anche una **grandezza additiva**, il che significa che **la variazione di entropia di un sistema costituito da più parti è uguale alla somma delle variazioni di entropia delle sue singole parti.**

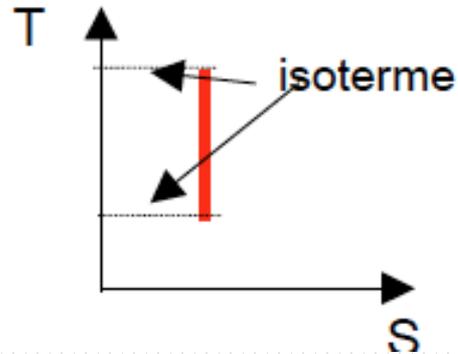
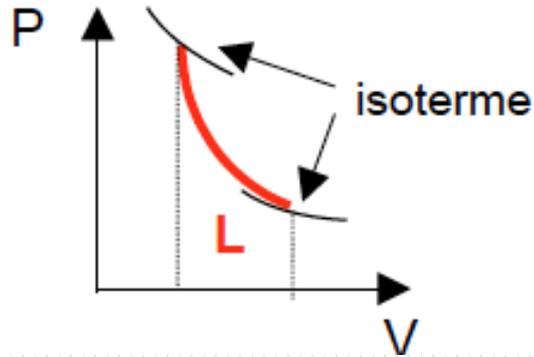
# IL DIAGRAMMA TS



## Rappresentazione del ciclo di Carnot



# ADIABATICA



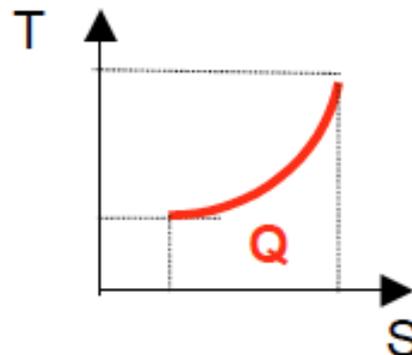
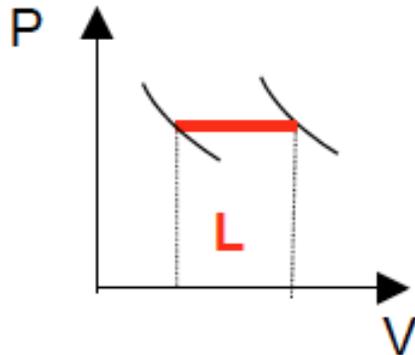
$$\delta Q = 0$$

$$dS = \frac{\delta Q}{T} = 0$$

$$\int_1^2 dS = 0$$

$$\Delta S = 0$$

# ISOBARA



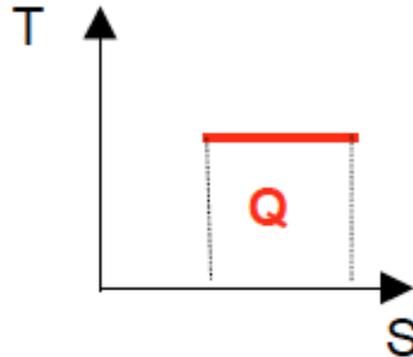
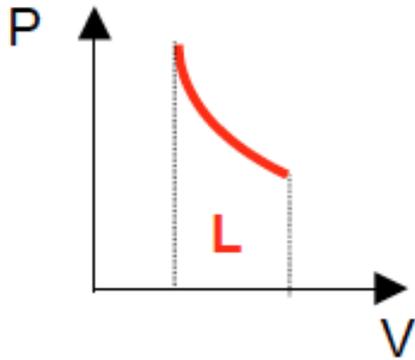
$$P = \text{const}$$

$$dS = \frac{\delta Q}{T} = c_p \frac{dT}{T}$$

$$\int_1^2 dS = \int_1^2 c_p \frac{dT}{T}$$

$$\Delta S = s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1}$$

## ISOTERMA



$$T = \text{const}$$

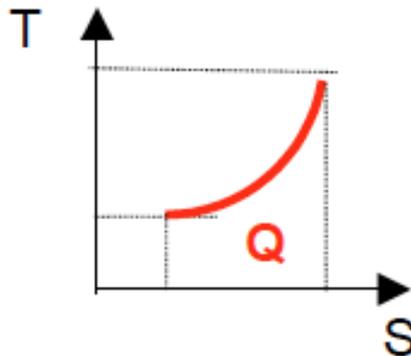
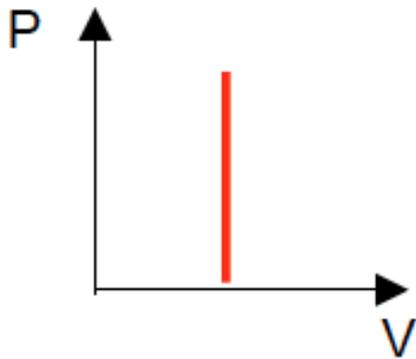
$$L = Q = RT \ln \frac{P_1}{P_2} = RT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$dS = \frac{\delta Q}{T}$$

$$\int_1^2 dS = \frac{Q}{T}$$

$$\Delta S = \frac{Q}{T} = R \ln \frac{P_1}{P_2} = R \ln \frac{V_2}{V_1}$$

## ISOCORA



$$V = \text{const}$$

$$\delta Q = c_v dT$$

$$dS = \frac{c_v dT}{T}$$

$$\int_1^2 dS = \int_1^2 \frac{c_v dT}{T}$$

$$\Delta S = s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1}$$

## ENUNCIATI ASSIOMATICI DEL PRIMO E DEL SECONDO PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA

### ASSIOMA 1

Esiste una forma di energia, detta **energia interna U**, che è una proprietà di un sistema ed è funzione delle coordinate misurabili che caratterizzano il sistema. Per un sistema chiuso e a riposo, le variazioni di questa proprietà possono esprimersi come  $dU = \delta Q - \delta L$

### ASSIOMA 2

L'**energia complessiva E** di un sistema e dell'ambiente ad esso circostante si conserva:  $\Delta E_{\text{tot}} = 0$

### ASSIOMA 3

Esiste una proprietà, detta **entropia (S)** che è funzione delle coordinate misurabili che caratterizzano un sistema. La variazione di questa proprietà dovuta a trasformazioni reversibili possono essere espressi come:  $dS = \delta Q / T$  [J/K]

### ASSIOMA 4

La variazione complessiva di entropia di un sistema e dell'ambiente ad esso circostante è positiva e tende a zero per quelle trasformazioni che tendono alla reversibilità:  $\Delta S_{\text{tot}} \geq 0$