Fisica Tecnica (Modulo 1)- LM4
Fisica Tecnica – L23

A.A. 2021-2022

Prof. Paolo ZAZZINI Dipartimento INGEO Università "G. d'Annunzio" Chieti-Pescara

Lezione n. 8

II Principio della TERMODINAMICA

Ciclo di Carnot diretto

Ciclo di Carnot inverso

Prof. Paolo ZAZZINI Dipartimento INGEO Università “G. d’Annunzio” Chieti-Pescara

I Principio della Termodinamica: *Principio di* ***conservazione dell'energia***.

Fissa **l'equivalenza formale fra calore e lavoro**, senza porre limitazioni alla possibilità di **trasformare l'una nell'altra**.

$$Q \longleftrightarrow L$$

L'esperienza pratica mostra che **le trasformazioni energetiche presentano limiti**.

Macchina termica: trasforma ciclicamente calore in lavoro.

Trasformazione **non completa**: una parte del calore disponibile non può essere trasformata in lavoro.

Processo di **scambio termico**: il calore passa spontaneamente sempre **da una sorgente ad un'altra a più bassa temperatura.**

II Principio della Termodinamica: *Principio della* ***degradazione dell'energia***.

Rispetta l'equivalenza dimensionale fra calore e lavoro (I Principio) ed **impone delle limitazioni** alle trasformazioni energetiche.

Introduce la **non equivalenza operativa** tra energia termica e meccanica.

Enunciato di CLAUSIUS:

"E' impossibile costruire una macchina che operi secondo un processo ciclico il cui unico effetto sia quello di trasferire il calore da un corpo ad una certa temperatura ad uno a temperatura più elevata".

Il **calore** passa spontaneamente solo **da un corpo più caldo ad uno più freddo**.

Per ottenere il **risultato inverso necessaria energia meccanica dall'esterno** (es. macchine frigorifero)
L'enunciato di Clausius sta alla **base** del funzionamento **delle macchine a ciclo inverso**.

Enunciato di KELVIN-PLANK:

"E' impossibile costruire una macchina che operi secondo un processo ciclico il cui unico effetto sia quello di trasformare in lavoro tutto il calore disponibile da una sorgente a temperatura uniforme e costante nel tempo".

Ogni **trasformazione da calore in lavoro** non è **mai completa** (es. calore non sfruttato in una automobile e gettato via con i gas di scarico)

L'enunciato di Kelvin Planck sta alla **base** del funzionamento **macchine a ciclo diretto**.

Macchine a ciclo diretto (termiche, motrici)

Enunciato di **Kelvin Planck** → per costruire una macchina termica necessarie **almeno due sorgenti a diversa temperatura**.

Apparente contraddizione all'enunciato di Kelvin-Planck: **espansione isoterma** di un gas ideale in un cilindro-pistone **senza fenomeni dissipativi** con fornitura di calore →

Trasformazione totale in lavoro del calore fornito.

Il processo avviene **una sola volta, non è ciclico**.

Processi reali **irreversibili:**

a) Nel **processo** spontaneo (**diretto**) **diminuisce la possibilità di ottenere l'effetto voluto** (es. trasformazione tra due forme di energia);
b) Per ristabilire le **condizioni iniziali** attraverso un **processo inverso** è necessario **compiere un'azione**, cioè spendere energia **dall'esterno** (effetto esterno);
c) Il compimento dei **due processi (diretto ed inverso)** lascia **traccia di sé** nell'ambiente circostante.

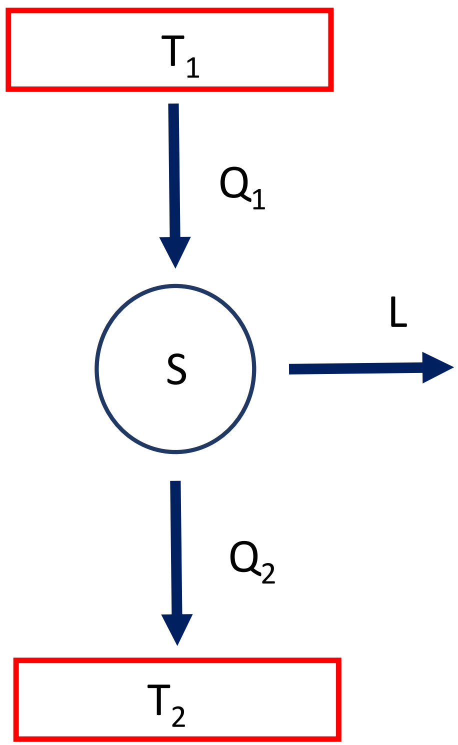
Cause di irreversibilità:

Squilibrio iniziale (chimico, termico, meccanico);
Presenza di **effetti dissipativi** (es: attrito, resistenza elettrica, anelasicità…).
Reintegro dell'energia **dall'esterno** (effetto esterno) per riprodurre le condizioni iniziali.

Ciclo di Carnot DIRETTO

Enunciato di **Kelvin Planck** → **Ciclo diretto** → Macchina termica (motrice): **Calore → Lavoro**.

Per il funzionamento ciclico della macchina termica **necessarie due sorgenti** a temperature diverse, $\mathbf{T_1}$ **e** $\mathbf{T_2}$.



Rendimento termodinamico del ciclo:

$$\eta = \frac{L}{Q_1}$$ (Lavoro e calore entrambi positivi)

I Principio della Termodinamica:

$$\Delta U = Q - L \Rightarrow \Delta U = Q_1 - |Q_2| - L$$

Trasformazione ciclica: $\Delta U = 0 \Rightarrow L = Q_1 - |Q_2|$

$$\eta = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}$$

$$\eta = \frac{q_1 - |q_2|}{q_1} = 1 - \frac{|q_2|}{q_1}$$

$$\eta < 1$$

Teorema di Carnot:

"Il rendimento massimo di una macchina termica che operi ciclicamente tra due sorgenti trasformando calore in lavoro è ottenibile da un ciclo in cui tutte le trasformazioni siano reversibili ed è indipendente dal fluido che compie il ciclo mentre dipende solo dalle temperature delle due sorgenti".

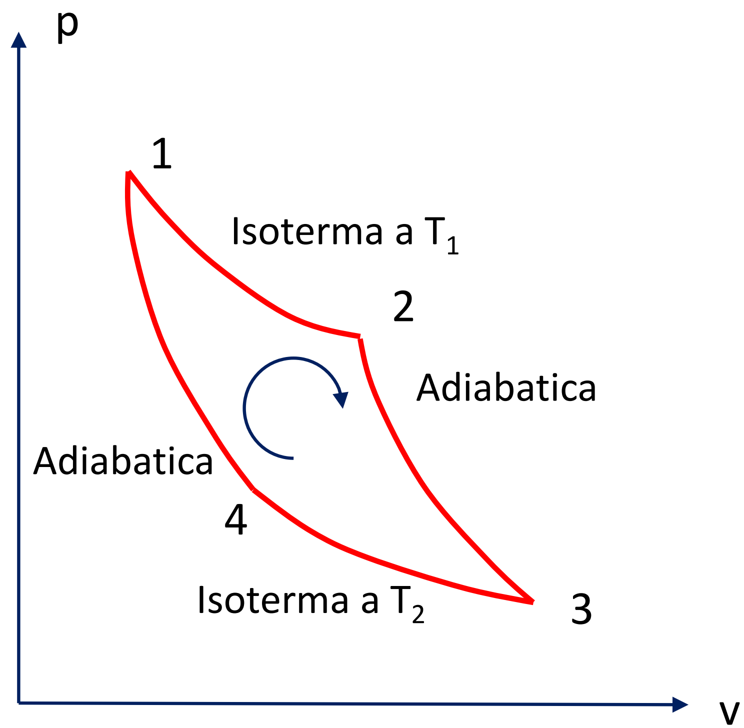
Rendimento massimo indipendente dal fluido → **gas ideale**.

Reversibilità delle trasformazioni → **trascurabili** tutte le **cause di dissipazione**.

Processi di **scambio termico senza differenze di temperature** tra le sorgenti ed il fluido.
Temperature delle sorgenti e del fluido **costanti** nel tempo ed **uguali** tra di loro → **scambi termici** solo lungo **trasformazioni isoterme** a temperature uguali a quelle delle sorgenti → **due processi isotermi reversibili a T_1 e T_2** .

Nelle due **trasformazioni che chiudono il ciclo impossibili scambi termici**.

Avverrebbero **con differenze finite di temperatura** (lungo le trasformazioni fluido a temperatura intermedia tra T_1 e T_2) → **due trasformazioni adiabatiche** che consentono di far passare il sistema dalla temperatura T_1 alla T_2 e viceversa.



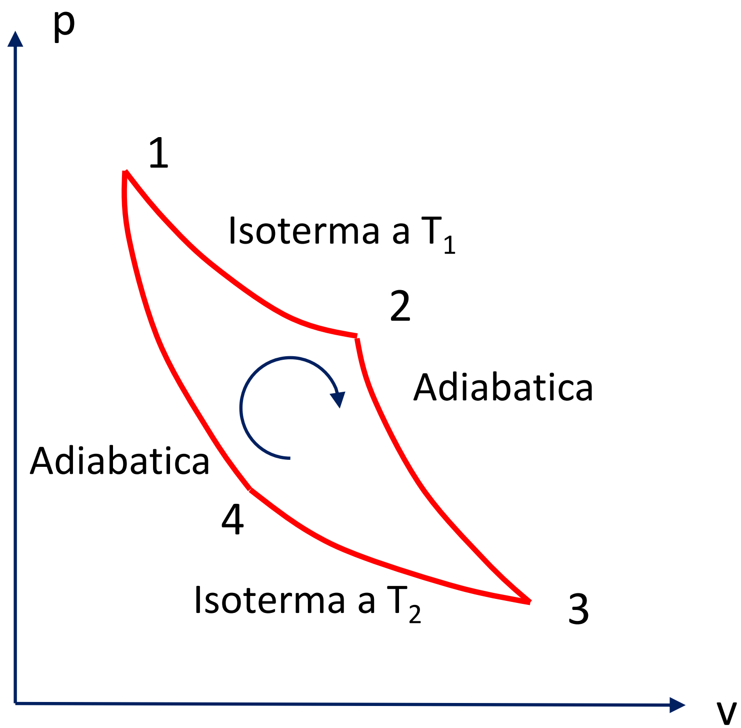
1-2: ISOTERMA

$$du = dq - dl$$

$$du = 0 \Rightarrow dq - dl = 0 \Rightarrow dq = dl \Rightarrow q_{12} = l_{12} = R \cdot T_1 \cdot ln\frac{v_2}{v_1} = R \cdot T_1 \cdot ln\frac{p_1}{p_2}$$

$$q_{12} > 0 \; ed \; l_{12} > 0$$

Il fluido **acquisisce calore** dalla sorgente a temperatura **T_1** ed effettua una **espansione a temperatura costante**: l'energia assorbita viene sfruttata per **produrre lavoro di espansione**.



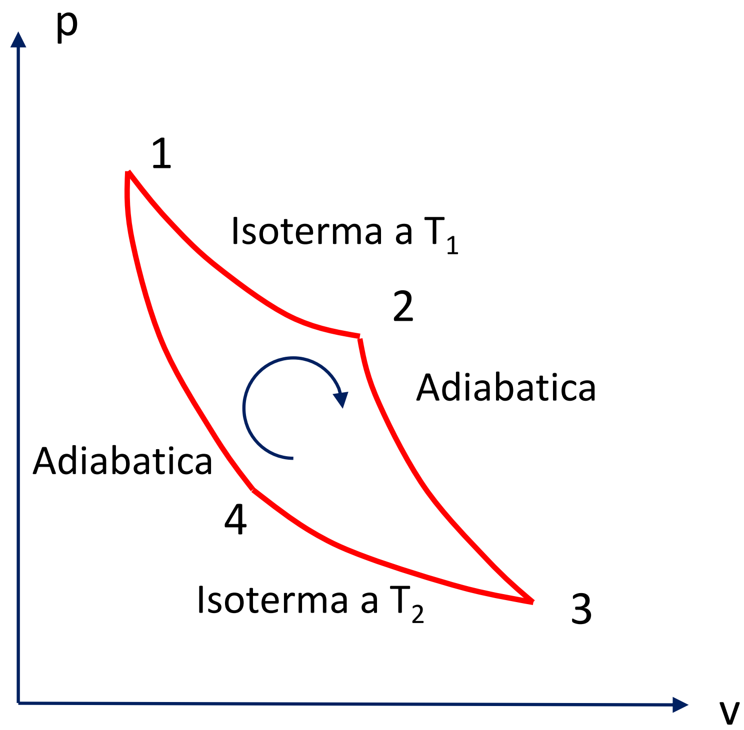
2-3: ADIABATICA

$$du = dq - dl$$

$$dq = 0 \Rightarrow du = -dl \Rightarrow u_3 - u_2 = -l_{23} \Rightarrow u_3 - u_2 = -\frac{p_2 \cdot v_2}{1-K} \cdot \left[\left(\frac{p_3}{p_2}\right)^{\frac{K-1}{K}} - 1\right]$$

$$l_{23} > 0 \Rightarrow u_3 < u_2$$

Il fluido **si espande** senza scambiare calore con l'esterno e **compie lavoro meccanico** a spese della sua **energia interna** che **diminuisce** provocando un **abbassamento di temperatura**.



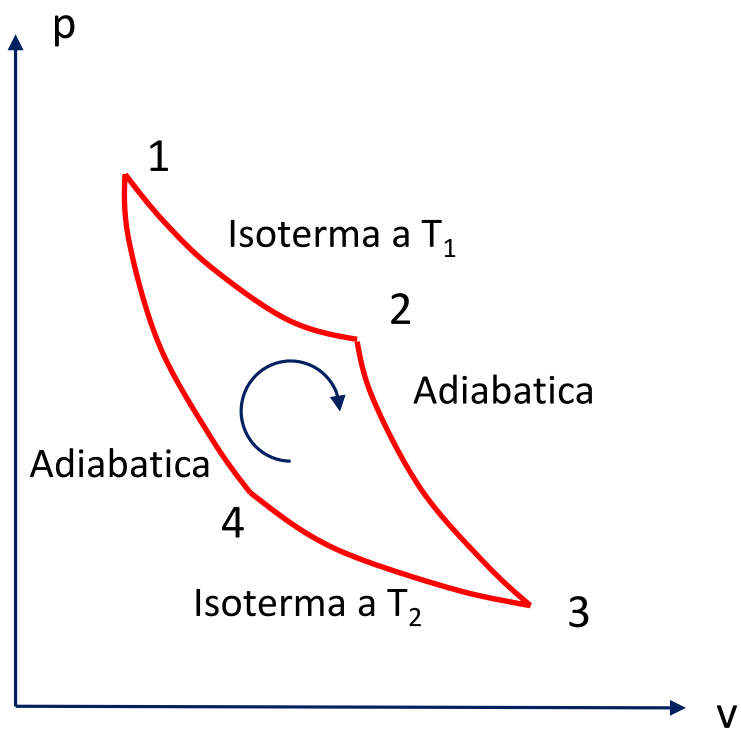
3-4: ISOTERMA

$$du = dq - dl$$

$$du = 0 \Rightarrow dq - dl = 0 \Rightarrow dq = dl \Rightarrow q_{34} = l_{34} = R \cdot T_2 \cdot ln\frac{v_4}{v_3} = R \cdot T_2 \cdot ln\frac{p_3}{p_4}$$

$$q_{34} < 0 \; ed \; l_{34} < 0$$

Il fluido **cede calore** alla sorgente a temperatura **T_2** ed effettua una **compressione a temperatura costante**.



4-1: ADIABATICA

$$du = dq - dl$$

$$dq = 0 \Rightarrow du = -dl \Rightarrow u_1 - u_4 = -l_{41} \Rightarrow u_1 - u_4 = -\frac{p_4 \cdot v_4}{1-K} \cdot \left[\left(\frac{p_1}{p_4}\right)^{\frac{K-1}{K}} - 1\right]$$

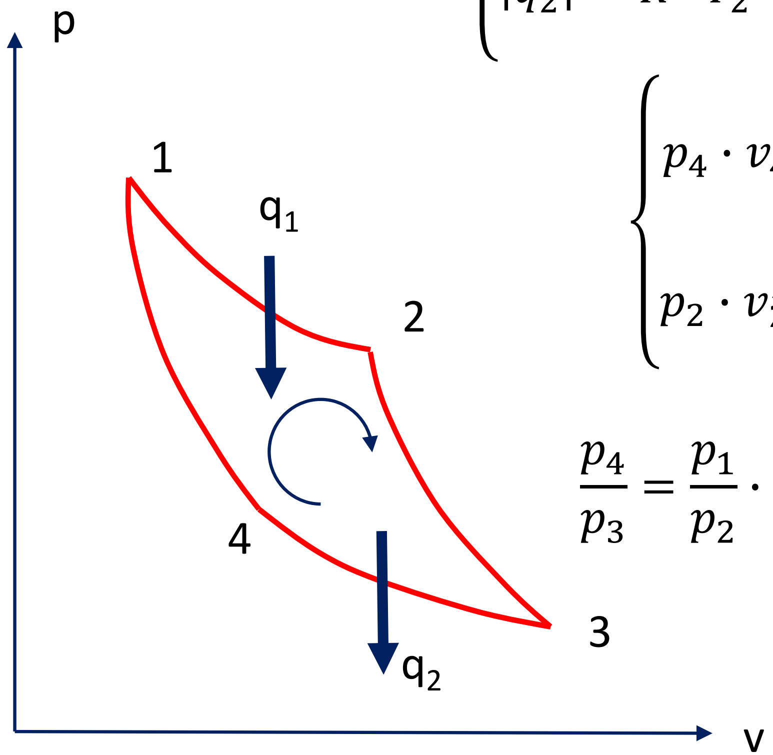
$$l_{41} < 0 \Rightarrow u_1 > u_4$$

Il fluido **viene compresso** senza scambiare calore con l'esterno e **subisce lavoro meccanico** che produce un **aumento di energia interna** provocando un **aumento di temperatura**.

RENDIMENTO DEL CICLO DI CARNOT DIRETTO

$$\eta = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1} \qquad \eta = \frac{q_1 - |q_2|}{q_1} = 1 - \frac{|q_2|}{q_1}$$

$$\begin{cases} q_1 = R \cdot T_1 \cdot ln\dfrac{p_1}{p_2} \\ |q_2| = R \cdot T_2 \cdot ln\dfrac{p_4}{p_3} \end{cases} \Rightarrow \eta = 1 - \frac{R \cdot T_2 \cdot ln\dfrac{p_4}{p_3}}{R \cdot T_1 \cdot ln\dfrac{p_1}{p_2}}$$



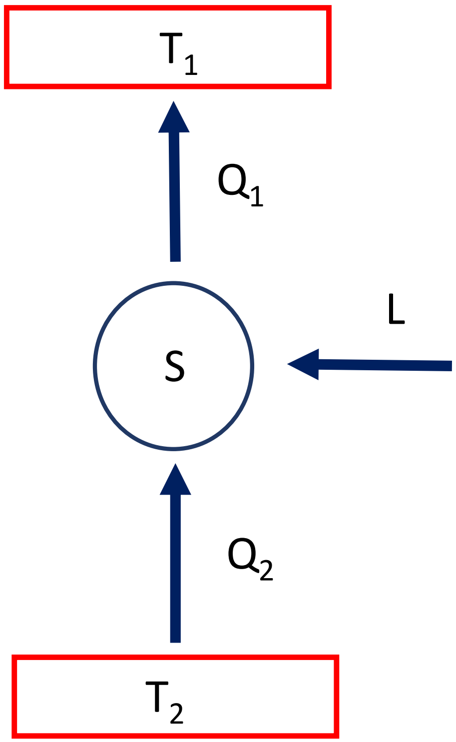
$$\begin{cases} p_4 \cdot v_4^K = p_1 \cdot v_1^K \Rightarrow \dfrac{p_4}{p_1} = \left(\dfrac{v_1}{v_4}\right)^K \Rightarrow p_4 = p_1 \cdot \left(\dfrac{v_1}{v_4}\right)^K \\ p_2 \cdot v_2^K = p_3 \cdot v_3^K \Rightarrow \dfrac{p_2}{p_3} = \left(\dfrac{v_3}{v_2}\right)^K \Rightarrow p_3 = p_2 \cdot \left(\dfrac{v_2}{v_3}\right)^K \end{cases}$$

$$\frac{p_4}{p_3} = \frac{p_1}{p_2} \cdot \left(\frac{v_1}{v_2} \cdot \frac{v_3}{v_4}\right)^K = \frac{p_1}{p_2} \cdot \left(\frac{p_2}{p_1} \cdot \frac{p_4}{p_3}\right)^K \Rightarrow \left(\frac{p_4}{p_3}\right)^{1-K} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{1-K}$$

$$\frac{p_4}{p_3} = \frac{p_1}{p_2} \Rightarrow \boxed{\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}} \qquad c.v.d.$$

Ciclo di Carnot INVERSO

Enunciato di **Clausius** → **Ciclo inverso** → Macchina frigorifero (operatrice):
Calore da sorgente a **bassa temperatura** ad una **a più alta temperatura** mediante apporto di **lavoro dall'esterno.**



Coefficiente di prestazione COP (di **effetto utile** o **efficienza**):

$$\varepsilon = COP = \frac{Q_2}{|L|}$$

I Principio della Termodinamica:

$$\Delta U = Q - L \Rightarrow \Delta U = Q_2 - |Q_1| - (-|L|) = 0$$

Trasformazione ciclica: $\Delta U = 0 \Rightarrow |L| = |Q_1| - Q_2$

$$\varepsilon = COP = \frac{Q_2}{|L|} = \frac{Q_2}{|Q_1| - Q_2}$$

$$\varepsilon = COP = \frac{q_2}{|l|} = \frac{q_2}{|q_1| - q_2}$$

$$\varepsilon \gtreqless 1$$

POMPA di CALORE

Macchina funzionante secondo il **ciclo inverso** con lo scopo di **fornire calore** ad una **sorgente calda** prelevandolo da una sorgente più fredda.

Effetto voluto: calore ceduto alla sorgente calda $\mathbf{Q_1}$

Coefficiente di **effetto utile** della pompa di **calore**

$$\varepsilon' = COP = \frac{|Q_1|}{|L|} = \frac{|Q_1|}{|Q_1| - Q_2} \qquad \varepsilon' = COP = \frac{|q_1|}{|l|} = \frac{|q_1|}{|q_1| - q_2}$$

Relazione tra i coefficienti di **effetto utile** del **frigorifero** e della **pompa di calore** funzionanti secondo lo **stesso ciclo**

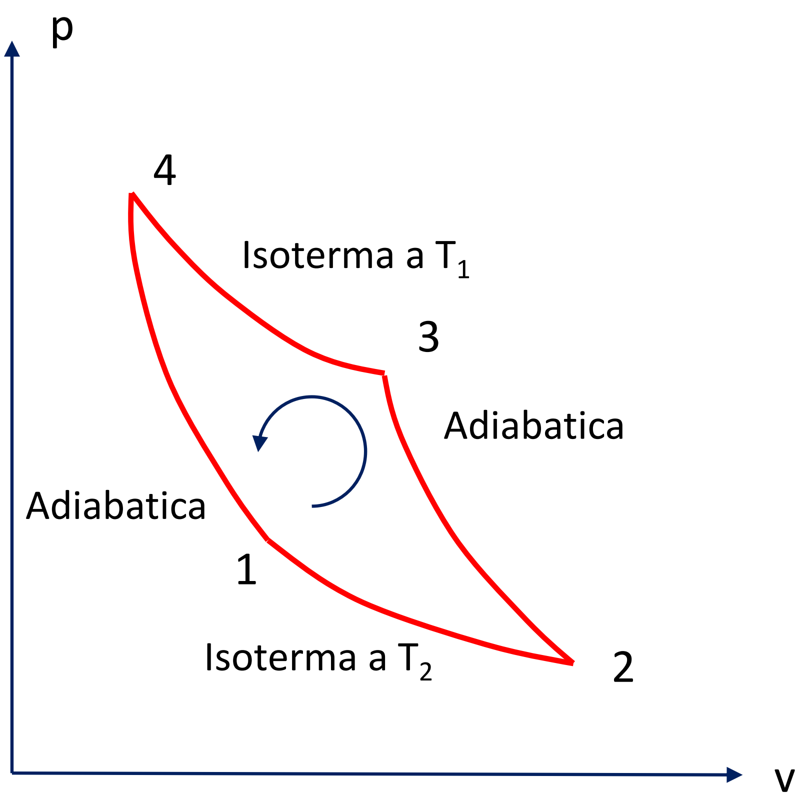
$$\varepsilon' = \varepsilon + 1$$

$$\varepsilon' > 1$$

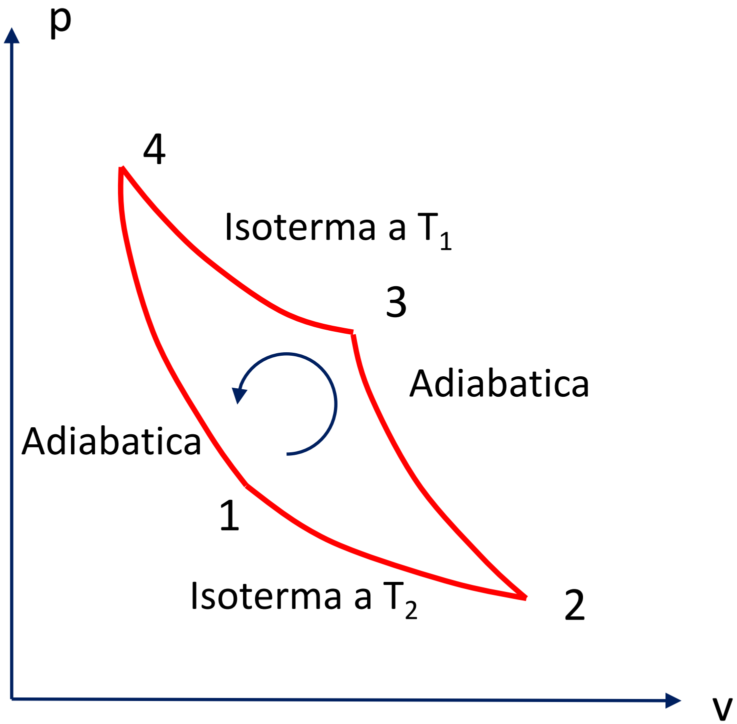
Per il **funzionamento ciclico** della macchina frigorifero **necessario apporto di lavoro dall’esterno.**

Ciclo inverso → **trasformazioni** percorse **in senso antiorario** sul diagramma p-v.

Reversibiltà → due isoterme e due adiabatiche → massime prestazioni ottenibili (teorema di Carnot).



1-2: ISOTERMA

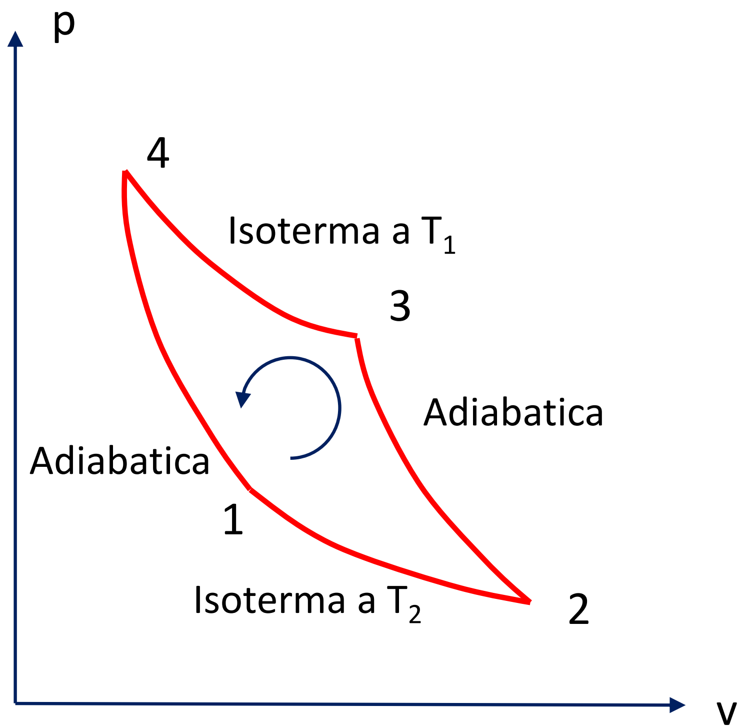


$$du = dq - dl$$

$$du = 0 \Rightarrow dq - dl = 0 \ \Rightarrow dq = dl \Rightarrow q_{12} = l_{12} = R \cdot T_2 \cdot ln\frac{v_2}{v_1} = R \cdot T_2 \cdot ln\frac{p_1}{p_2}$$

$$q_{12} > 0 \ ed \ l_{12} > 0$$

Il fluido **acquisisce calore** dalla sorgente a temperatura **T_2** (**effetto frigorifero**) ed effettua una **espansione a temperatura costante**: l'energia assorbita viene sfruttata per compiere **l' espansione 1-2**.



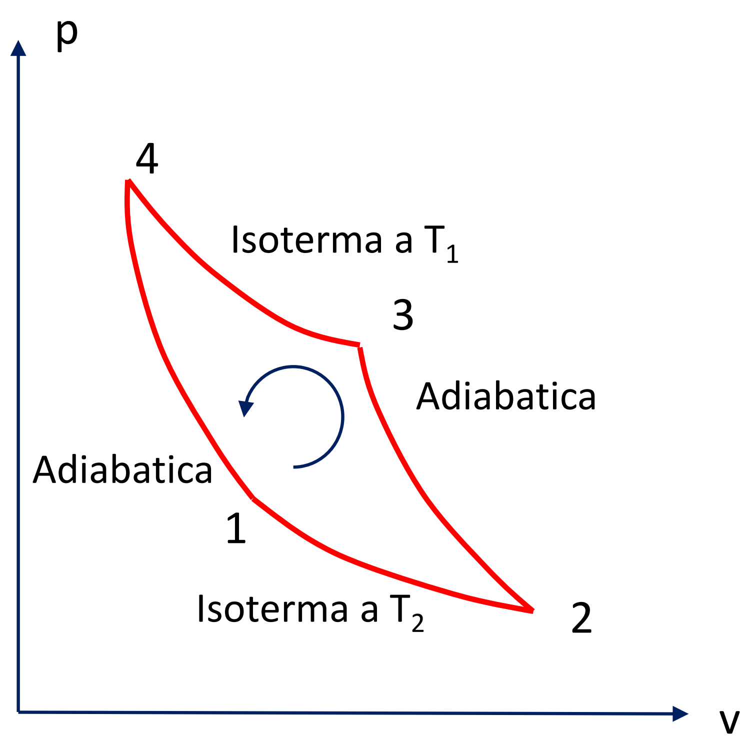
2-3: ADIABATICA

$$du = dq - dl$$

$$dq = 0 \Rightarrow du = -dl \Rightarrow u_3 - u_2 = -l_{23} \Rightarrow u_3 - u_2 = -\frac{p_2 \cdot v_2}{1-K} \cdot \left[\left(\frac{p_3}{p_2}\right)^{\frac{K-1}{K}} - 1\right]$$

$$l_{23} < 0 \Rightarrow u_3 > u_2$$

Il fluido **viene compresso** subendo **lavoro meccanico** senza scambiare calore con l'esterno → **aumento** della sua **energia interna** e conseguente **aumento di temperatura**.



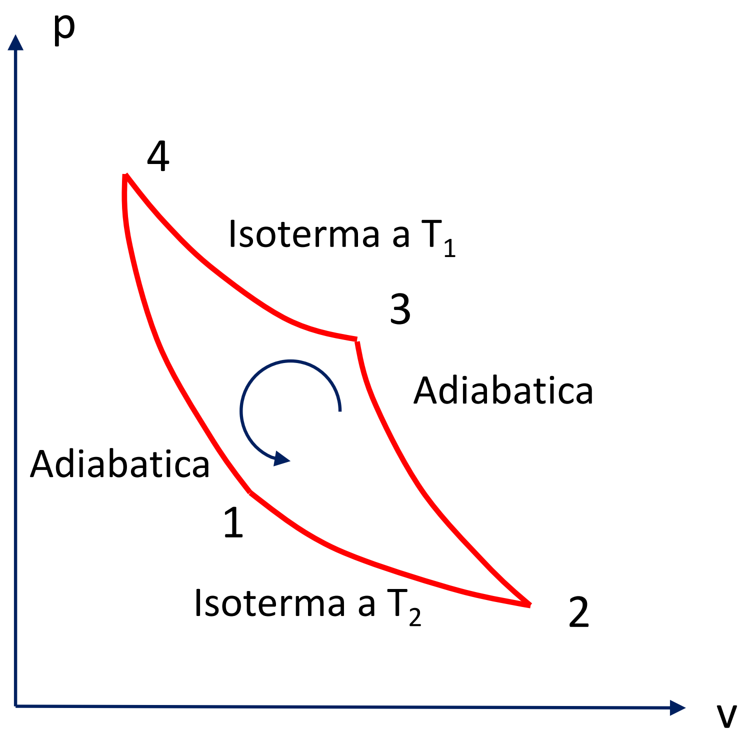
3-4: ISOTERMA

$$du = dq - dl$$

$$du = 0 \Rightarrow dq - dl = 0 \Rightarrow dq = dl \Rightarrow q_{34} = l_{34} = R \cdot T_1 \cdot ln\frac{v_4}{v_3} = R \cdot T_1 \cdot ln\frac{p_3}{p_4}$$

$$q_{34} < 0 \; ed \; l_{34} < 0$$

Il fluido **cede calore** alla sorgente a temperatura $\mathbf{T_1}$ ed effettua una **compressione a temperatura costante**.



4-1: ADIABATICA

$$du = dq - dl$$

$$dq = 0 \Rightarrow du = -dl \Rightarrow u_1 - u_4 = -l_{41} \Rightarrow u_1 - u_4 = -\frac{p_4 \cdot v_4}{1-K} \cdot \left[\left(\frac{p_1}{p_4}\right)^{\frac{K-1}{K}} - 1\right]$$

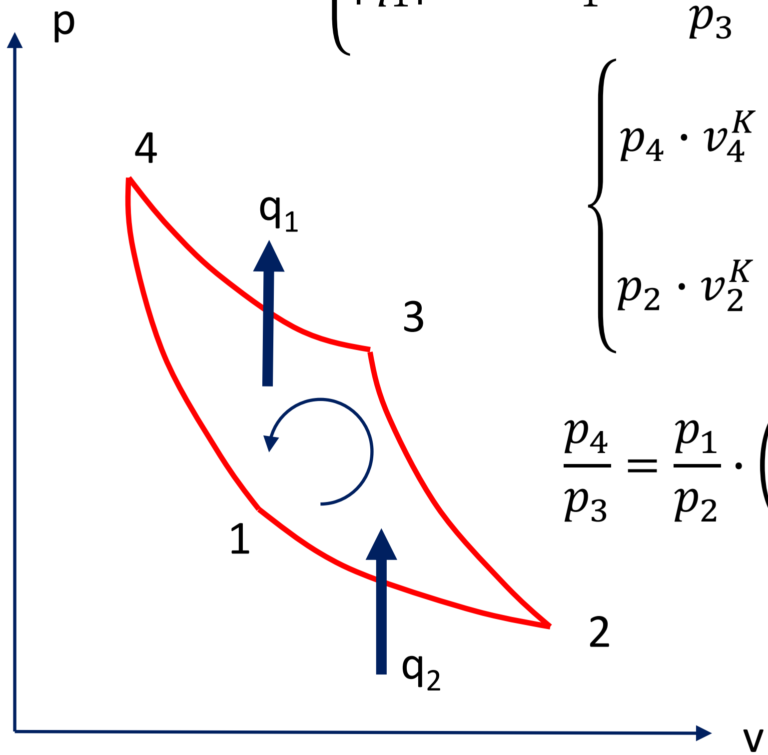
$$l_{41} > 0 \Rightarrow u_1 < u_4$$

Il fluido **viene fatto espandere** senza scambiare calore con l'esterno producendo una **diminuzione di energia interna** con conseguente **diminuzione di temperatura**.

COEFFICIENTE DI EFFETTO UTILE DEL CICLO DI CARNOT INVERSO

$$\varepsilon = COP = \frac{Q_2}{|L|} = \frac{Q_2}{|Q_1| - Q_2} \qquad \varepsilon = COP = \frac{q_2}{|l|} = \frac{q_2}{|q_1| - q_2}$$

$$\begin{cases} q_2 = R \cdot T_2 \cdot ln\dfrac{p_1}{p_2} \\ |q_1| = R \cdot T_1 \cdot ln\dfrac{p_4}{p_3} \end{cases} \Rightarrow \varepsilon = \frac{R \cdot T_2 \cdot ln\dfrac{p_1}{p_2}}{R \cdot T_1 \cdot ln\dfrac{p_4}{p_3} - R \cdot T_2 \cdot ln\dfrac{p_1}{p_2}}$$



$$\begin{cases} p_4 \cdot v_4^K = p_1 \cdot v_1^K \Rightarrow \dfrac{p_4}{p_1} = \left(\dfrac{v_1}{v_4}\right)^K \Rightarrow p_4 = p_1 \cdot \left(\dfrac{v_1}{v_4}\right)^K \\ p_2 \cdot v_2^K = p_3 \cdot v_3^K \Rightarrow \dfrac{p_2}{p_3} = \left(\dfrac{v_3}{v_2}\right)^K \Rightarrow p_3 = p_2 \cdot \left(\dfrac{v_2}{v_3}\right)^K \end{cases}$$

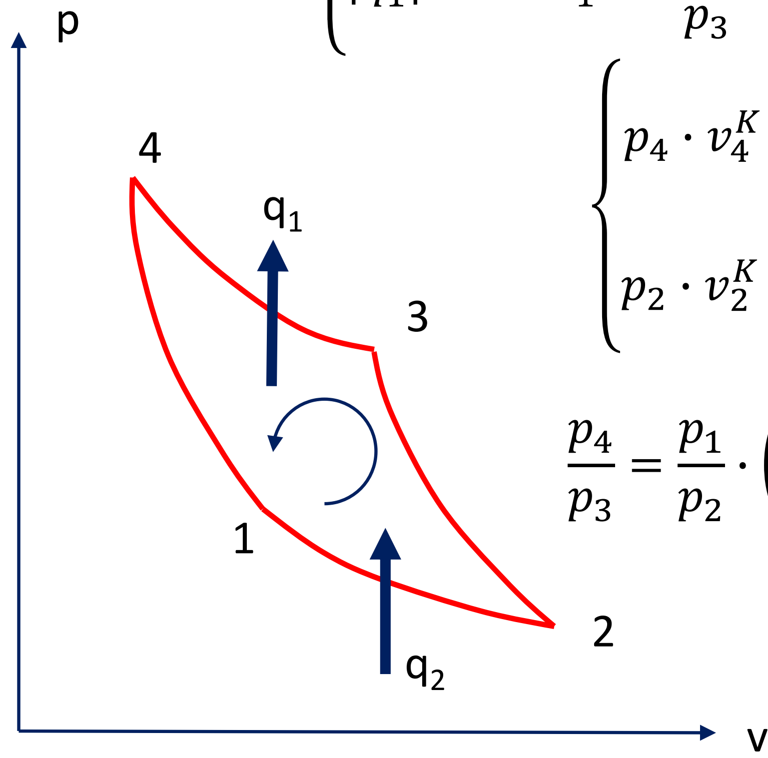
$$\frac{p_4}{p_3} = \frac{p_1}{p_2} \cdot \left(\frac{v_1}{v_2} \cdot \frac{v_3}{v_4}\right)^K = \frac{p_1}{p_2} \cdot \left(\frac{p_2}{p_1} \cdot \frac{p_4}{p_3}\right)^K \Rightarrow \left(\frac{p_4}{p_3}\right)^{1-K} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{1-K}$$

$$\frac{p_4}{p_3} = \frac{p_1}{p_2} \Rightarrow \boxed{\varepsilon = \frac{q_2}{|l|} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}} \qquad c.v.d.$$

COEFFICIENTE DI EFFETTO UTILE DEL CICLO DI CARNOT INVERSO

$$\varepsilon' = COP = \frac{|Q_1|}{|L|} = \frac{|Q_1|}{|Q_1| - Q_2} \qquad \varepsilon' = COP = \frac{|q_1|}{|l|} = \frac{|q_1|}{|q_1| - q_2}$$

$$\begin{cases} q_2 = R \cdot T_2 \cdot ln\dfrac{p_1}{p_2} \\ |q_1| = R \cdot T_1 \cdot ln\dfrac{p_4}{p_3} \end{cases} \Rightarrow \varepsilon' = \frac{R \cdot T_1 \cdot ln\dfrac{p_4}{p_3}}{R \cdot T_1 \cdot ln\dfrac{p_4}{p_3} - R \cdot T_2 \cdot ln\dfrac{p_1}{p_2}}$$



$$\begin{cases} p_4 \cdot v_4^K = p_1 \cdot v_1^K \Rightarrow \dfrac{p_4}{p_1} = \left(\dfrac{v_1}{v_4}\right)^K \Rightarrow p_4 = p_1 \cdot \left(\dfrac{v_1}{v_4}\right)^K \\ p_2 \cdot v_2^K = p_3 \cdot v_3^K \Rightarrow \dfrac{p_2}{p_3} = \left(\dfrac{v_3}{v_2}\right)^K \Rightarrow p_3 = p_2 \cdot \left(\dfrac{v_2}{v_3}\right)^K \end{cases}$$

$$\frac{p_4}{p_3} = \frac{p_1}{p_2} \cdot \left(\frac{v_1}{v_2} \cdot \frac{v_3}{v_4}\right)^K = \frac{p_1}{p_2} \cdot \left(\frac{p_2}{p_1} \cdot \frac{p_4}{p_3}\right)^K \Rightarrow \left(\frac{p_4}{p_3}\right)^{1-K} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{1-K}$$

$$\frac{p_4}{p_3} = \frac{p_1}{p_2} \Rightarrow \boxed{\varepsilon' = \frac{T_1}{T_1 - T_2}} \qquad c.v.d.$$