CONVENZIONI DI NOTAZIONE

Q_{12}	Calore scambiato da 1 a 2.
$Q_e \equiv Q_s$	Calore entrante o di sorgente.
$Q_u \equiv Q_i$	Calore uscente o ceduto al pozzo.

CONVERSIONI UNITÀ DI MISURA PIÙ FREQUENTI

$Cal = 4{,}186 * Joule$
$Kelvin = °C + 273{,}15$
$°C = (°F - 32) * (5/9)$
$°F = °C * (9/5) + 32$
$Bar = 10^5 * Pa$
$ATM = 101325 * Pa \simeq 100000 * Pa$
$ATA = 98066{,}5 * Pa \simeq 100000 * Pa$

Altre unità di conversione: Wikipedia: Conversioni unità di misura
Oppo: Tabella unità di misura conversioni

DENSITÀ, VOLUME SPECIFICO, PESO SPECIFICO

Per definizione è la massa riferita all'unità di volume: $\rho = \frac{m}{V} = \left[\frac{kg}{m^3}\right]$

Il reciproco della densità è il **volume specifico**: $v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho}$

La **densità relativa** è il rapporto tra la densità di una sostanza e la densità di una sostanza di riferimento a una temperatura specificata (generalmente acqua a 4°C, per la quale $\rho_{acqua} = 1000 \ kg/m^3$) ed è una grandezza adimensionale: $d = \frac{\rho}{\rho_{acqua}}$

Il peso di un volume unitario di una sostanza è detto **peso specifico** e dipende dall'**accelerazione di gravità g** (sulla terra $g \simeq 9{,}822 \ m/s^2$):

$$\gamma = \rho g = [N/m^3]$$

PRESSIONE

La pressione è la forza esercitata in direzione normale da un fluido su una superficie di area unitaria. $1Pa = 1 \, N/m^2$.

La pressione in un fluido non in movimento aumenta linearmente all'aumento della profondità: $p = p_{atm} + \rho g h$
con p_{atm} pressione atmosferica e h profondità della superficie libera.

La **legge di Pascal** afferma che la forza applicata da un fluido è direttamente proporzionale all'area della superficie:

$$p_1 = p_2 \rightarrow \frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

ENERGIE

L'**energia totale** di un sistema riferita all'unità di massa è:

$$e = E/m = [kJ/kg]$$

dove E è la somma di energia interna, energia potenziale ed energia cinetica:

$$E = U + E_p + E_c = U + mgz + \frac{1}{2} m w^2$$

Forma di energia	*Totali*	*Riferita all'unità di massa*
Energia interna	U	u
Energia potenziale	$E_p = mgz = [kJ]$	$e_p = gz = [kJ/kg]$
Energia cinetica	$E_c = m\frac{w^2}{2} = [kJ]$	$e_c = \frac{w^2}{2} = [kJ/kg]$

z è la quota del centro di massa del sistema.

L'energia è capace di attraversare il contorno di un sistema chiuso sottoforma di calore e lavoro.

CALORE

Si può scambiare calore in 3 modi:
Conduzione termica:trasferimento di energia dalle particelle più energetiche a quelle adiacenti meno energetiche.
Convenzione termica: trasferimento di energia tra una superficie solida e il fluido adiacente in moto.
Irraggiamento termico: trasferimento di energia dovuto all'emissione di onde elettromagnetiche.

Se in un processo non vi è scambio di calore esso è detto **trasformazione adiabatica**.

LAVORO

Genericamente: $dL = \vec{F} ds = [J]$
Definito all'unità di massa risulta: $l = L/m = \left[\frac{kJ}{kg}\right]$

Lavoro di variazione di volume: $L_v = \int_1^2 p\, dV = 0$
Lavoro di pulsione: $L_p = Fs = pAs = pV = [J]$, $l_p = pv = [kJ/kg]$

PRINCIPI DELLA TERMODINAMICA

1 PRINCIPIO

$$\Delta E = E_{entrante} - E_{uscente}$$

$$\Delta U = Q^{\leftarrow} - L^{\downarrow}$$

Convenzione segni	*Entrante/Subito*	*Uscente/Effettuato*
Calore: $Q^{\leftarrow}$	+	-
Lavoro: $L^{\downarrow}$	-	+

In un ciclo, o per più sottosistemi inclusi in un sistema isolato, vale:

$$\sum U_i = 0 \Longrightarrow \begin{cases} \sum Q_i = 0 \\ \sum L_i = 0 \end{cases}$$

ΔU è la variazione di energia interna di un sistema.

2 PRINCIPIO

Una trasformazione può avvenire soltanto se soddisfa il 1 e 2 principio della termodinamica.
E' impossibile convertire in lavoro tutta l'energia fornita sottoforma di calore → Nessun motore termico può avere rendimento pari al 100%.
Il calore fluisce spontaneamente solo nel verso delle temperature decrescenti.

Enunciato di Kelvin-Planck: 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 Clausius: E' impossibile realizzare una macchina con funzionamento ciclico il cui unico effetto sia il trasferimento di una quantità di calore da un corpo a bassa temperatura a un altro a temperatura più alta.

TRASFORMAZIONI REVERSIBILI E IRREVERSIBILI

Trasformazione reversibile: può essere ripercorsa in senso inverso senza che se ne trovi traccia nell'ambiente circostante.
Trasformazione irreversibile: se non è reversibile, quindi non è possibile tornare indietro in modo spontaneo ristabilendo le condizioni iniziali.
Reversibilità interna: nessuna irreversibilità si verifica all'interno del suo contorno.
Reversibilità esterna: nessuna irreversibilità all'esterno del suo contorno.

TRASFORMAZIONE POLITROPICA

E' una trasformazione durante la quale la pressione e il volume sono correlati dall'**equazione della politropica**:

$$pV^n = C$$
$$n = \frac{c_x - c_p}{c_x - c_v} = -\frac{vdP}{Pdv}$$

dove n e C sono costanti.
Sostituendo questa equazione in quella del lavoro di variazione del volume, otteniamo:

$$p = CV^{-n} \rightarrow$$
$$L_v = \int_1^2 p\ dV = \int_1^2 CV^{-n}\ dV = C\frac{V_2^{-n+1} - V_1^{-n+1}}{-n+1} = \frac{p_2V_2 - p_1V_1}{1-n}$$

nel caso di $n = 1 \rightarrow L_v = pVln\frac{V_2}{V_1}$

Tutte le trasformazioni possono essere ricondotte all'equazione della politropica:

Trasformazione	c_x	n
Isoterma	$\pm\infty$	1
Isocora	c_v	$\pm\infty$
Isobara	c_p	0
Adiabatica	0	$k = c_p/c_v$

ENTROPIA

$$\Delta S_{sistema} = S_{finale} - S_{iniziale}$$
$$\Delta S = S_{Q^\leftarrow} + S_{irreversibili}$$

$S_{Q^\leftarrow} = \int \frac{\delta Q}{T} = \sum \frac{Q_i}{T_i}$ In sostanza è la somma di calore ceduto e ricevuto riguardante il sistema analizzato.

	Calore entrante	*Calore uscente*	*Adiabatica*
$S_{Q^\leftarrow}$	> 0	< 0	$= 0$
	Se reversibile	*Se irreversibile*	
S_{irr}	$= 0$	> 0	

Se siamo in un sistema isolato composto che non scambia calore con l'esterno: $\underline{\sum S_{Q^\leftarrow} = 0}$

CALCOLO DELL'ENTROPIA ATTRAVERSO P, V, T

Partendo dal 1 primo principio della termodinamica e dalla definizione di entalpia per una trasformazione reversibile, si possono ricavare le seguenti formule tutte equivalenti:

$$\Delta S = c_v ln\frac{T_2}{T_1} + Rln\frac{V_2}{V_1}$$
$$\Delta S = c_p ln\frac{T_2}{T_1} + Rln\frac{P_2}{P_1}$$
$$\Delta S = c_p ln\frac{V_2}{V_1} + c_v ln\frac{P_2}{P_1}$$

Essendo l'entropia funzione di stato, queste formule possono applicarsi anche alla trasformazione irreversibile, considerando che non dipende dal percorso compiuto.

RIEPILOGO PER I CALCOLI RIFERITI ALL'UNITÀ DI MASSA

Nome trasformazione	*Caratteristica trasformazione*	*Lavoro*	*Calore*	*Energia interna*	*Entalpia*	*Entropia*
		$l = \int p\, dv$	$q = \int dq$	Δu	Δh	Δs
Isobara	$P = costante$	$p\Delta v$	$c_p \Delta T$	$c_v \Delta T$	$c_p \Delta T$	$c_p ln \frac{T_2}{T_1}$
Isocora	$V = costante$		$c_v \Delta T$	$c_v \Delta T$	$c_p \Delta T$	$c_v ln \frac{T_2}{T_1}$
Isoterma	$T = costante$	$RT ln \frac{v_2}{v_1}$; $-RT ln \frac{p_2}{p_1}$	$RT ln \frac{v_2}{v_1}$; $-RT ln \frac{p_2}{p_1}$			$R ln \frac{v_2}{v_1}$; $-R ln \frac{p_2}{p_1}$
Adiabatica	$dQ = 0$	$-c_v \Delta T \frac{RT_1}{k-1}\left[1-\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]$		$c_v \Delta T$	$c_p \Delta T$	
Generica politropica	$c_x = costante$	$(c_x - c_v)\Delta T \frac{RT_1}{n-1}\left[1-\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right]$	$c_x \Delta T$	$c_v \Delta T$	$c_p \Delta T$	$c_p ln \frac{T_2}{T_1} - R ln \frac{p_2}{p_1}$; $c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R ln \frac{v_2}{v_1}$

Per passare ai valori generici (lettere maiuscole L, U, H, S, etc.) basterà moltiplicare le formule per la massa m.

GAS PERFETTI

EQUAZIONE DI STATO DEI GAS PERFETTI

$$pv = RT$$

p pressione assoluta. T temperatura assoluta. v volume specifico. R costante di proporzionalità detta costante del gas.

$$R = \frac{Costante\ del\ gas}{Massa\ Molare\ gas} = \frac{R_u}{M} = \frac{8314{,}47}{28{,}8} \simeq 296{,}9 \left[\frac{J}{kg * K}\right]$$

R_u è la costante universale dei gas. M è la massa molare media (nell'esempio quella dell'aria).

$$V = MNv \equiv mv \rightarrow pV = mRT$$

CALORI SPECIFICI DEI GAS PERFETTI

Calori specifici	*Monoatomico*	*Biatomico*	*Poliatomico*
A pressione costante: c_p	$5R/2$	$7R/2$	$8R/2$
A volume costante: c_v	$3R/2$	$5R/2$	$6R/2$

$$c_p = c_v + R = [kJ/(kg * K)]$$

Se espressi su base molare vale: $\overline{c_p} = \overline{c_v} + R_u = [kJ/(kg * K)]$

Rapporto dei calori specifici: $k = c_p/c_v$

Per i gas monoatomici k può essere considerato costante pari a 1,667.

Per le **sostanze incomprimibili, quindi per solidi e liquidi**, c_p e c_v sono identici e costanti: $c_p = c_v = c$

GAS PIÙ FREQUENTEMENTE UTILIZZATI

Monoatomici:
Biatomici: Aria, N_2
Poliatomici:

ENERGIA INTERNA ED ENTALPIA

L'energia interna per un gas perfetto è in funzione della sola temperatura: $u = u(T)$.
Combinando la relazione che definisce l'entalpia h, e l'eq. di stato:

$$\begin{cases} h = u + pv \\ pv = RT \end{cases} \rightarrow h = u + RT = [J/kg]$$

L'entalpia descrive la quantità di energia che un sistema termodinamico può scambiare con l'ambiente.
La variazione di entalpia è uguale al calore scambiato dal sistema con l'ambiente esterno.

Se l'entalpia non è riferita all'unità di massa: $H = U + pV = [J]$

RAPPORTO DI COMPRESSIONE VOLUMETRICO

$$\beta = \frac{V_i}{V_f}$$

MACCHINE TERMICHE

Serbatoio di calore o energia termica: corpo di capacità termica ($massa * calore\ specifico$) in grado di fornire o assorbire una qualsiasi quantità finita di calore senza subire alcuna variazione di temperatura.
I serbatoi che forniscono energia sottoforma di calore sono detti **sorgenti**, mentre quelli che lo assorbono sono detti **pozzi**.

Motore termico: converte calore in lavoro.

In un sistema chiuso funzionante secondo un ciclo termodinamico, ΔU è zero, quindi il **lavoro netto in uscita dal sistema** risulta essere:

$$L_{n,u} = Q_e - Q_u = \ [J]$$

RENDIMENTO TERMICO

Qualifica l'efficienza di un motore termico.

$$efficienza = \frac{energia\ ottenuta}{energia\ fornita} \rightarrow \eta_t = \frac{L_{n,u}}{Q_e} \equiv 1 - \frac{Q_u}{Q_e}$$

E' sempre minore di 1 (fatta eccezione per i frigoriferi).

RENDIMENTO TERMICO NELLE MACCHINE TERMICHE REVERSIBILI

Utilizzando l'equazione del bilancio di entropia ottengo:

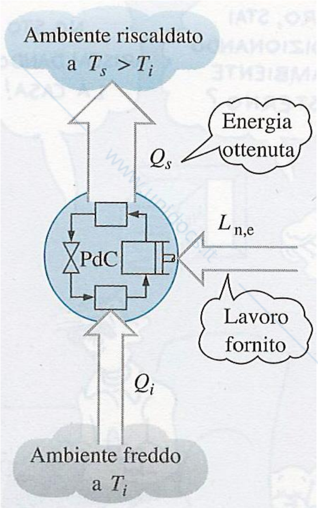
$$\left(\frac{Q_e}{Q_u}\right)_{rev} \equiv \frac{T_e}{T_u} \rightarrow \eta_t = 1 - \frac{T_u}{T_e} \equiv \eta_{t,Carnot}$$

TEOREMI DI CARNOT

Si riferiscono al rendimento dei motori termici reversibili e irreversibili.

1. Il rendimento di un motore termico irreversibile è sempre inferiore a quello di uno reversibile che operi tra due stessi serbatoi di calore.
2. I rendimenti di tutti i motori termici reversibili che operino tra i due stessi serbatoi di calore sono gli stessi.

FRIGORIFERI



Impiegano un fluido refrigerante. Il ciclo più comunemente utilizzato è quello *frigorifero a compressione di vapore*, realizzato tramite un compressore, un condensatore, una valvola di laminazione e un evaporatore.

Asportano il calore dall'ambiente caldo, scaricandolo in un pozzo ad alta temperatura.

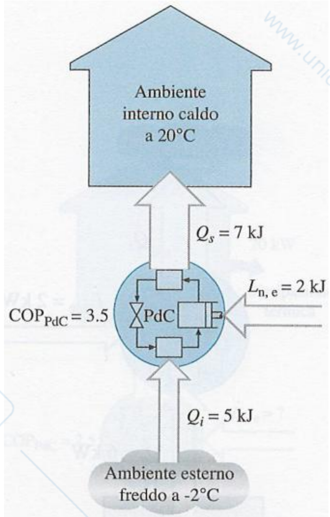
COEFFICIENTE DI PRESTAZIONE

$$COP_F = \frac{energia\ ottenuta}{energia\ fornita} = \frac{Q_i}{L_{n,e}} \equiv \frac{1}{Q_s/Q_i - 1}$$

$$L_{n,e} = Q_s - Q_i = [J]$$

Da notare che COP_F può essere maggiore dell'unità, vale a dire che la quantità di calore asportata dall'ambiente freddo può essere maggiore dalla quantità di lavoro speso.

POMPE DI CALORE



Trasferiscono calore da un ambiente a bassa temperatura a uno ad alta temperatura.

Ad esempio una stufa elettrica o un climatizzatore con pompa di calore.

COEFFICIENTE DI PRESTAZIONE

$$COP_{PdC} = \frac{energia\ ottenuta}{energia\ fornita} = \frac{Q_s}{L_{n,e}} \equiv \frac{1}{1 - Q_i/Q_s}$$

Da notare che COP_{PdC} è <u>sempre</u> maggiore dell'unità.

PRESTAZIONI IN RELAZIONE

Per valori uguali di Q_i e Q_s si ha: $COP_{PdC} = COP_F + 1$

CICLI TERMODINAMICI

Eliminando dal ciclo reale tutte le complessità e le irreversibilità interne, si ottiene un **ciclo ideale**.
Solitamente vengono trascurate anche le variazioni di energia cinetica e potenziale del fluido evolvente utilizzato.

Nei diagrammi p-v e T-s, l'area racchiusa dai cicli ideali rappresenta rispettivamente il **lavoro netto** e la **quantità netta di calore** scambiata durante il ciclo.
Il **rendimento termico** di un motore termico è il rapporto tra il lavoro netto prodotto dal motore e la quantità di calore che gli viene fornita:

$$\eta_t = \frac{L_n}{Q_e}\ ,\ \eta_t = \frac{l_n}{q_e}$$

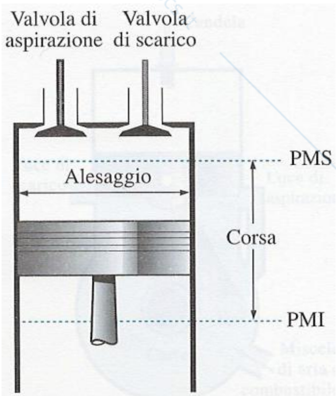
Per un sistema che subisce una trasformazione ciclica si ha:

$$\Delta U_{ciclo} = 0$$

MOTORI ALTERNATIVI

I componenti fondamentali di un motore alternativo sono il **cilindro ed il pistone**.

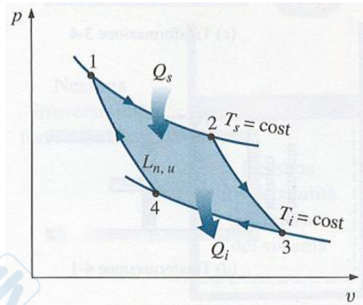
Il pistone si muove alternatamente nel cilindro, tra due posizioni fisse:
PMS (punto morto superiore): la posizione del pistone quando esso racchiude il volume più piccolo all'interno del cilindro.
PMI (punto morto inferiore): la posizione del pistone quando esso racchiude il volume più grande all'interno del cilindro.



CICLO DI CARNOT

Ciclo ideale reversibile composto da 4 trasformazioni reversibili, due isoterme e due adiabatiche, e può essere utilizzato con riferimento sia a un sistema chiuso, sia a uno a flusso stazionario.

1. Somministrazione di calore isoterma.
2. Espansione isoentropica.
3. Sottrazione di calore isoterma.
4. Compressione isoentropica.



Il ciclo di Carnot rappresentato sul diagramma p-υ.

E' il **ciclo con maggiore efficienza** che si possa eseguire tra due sorgenti termiche.

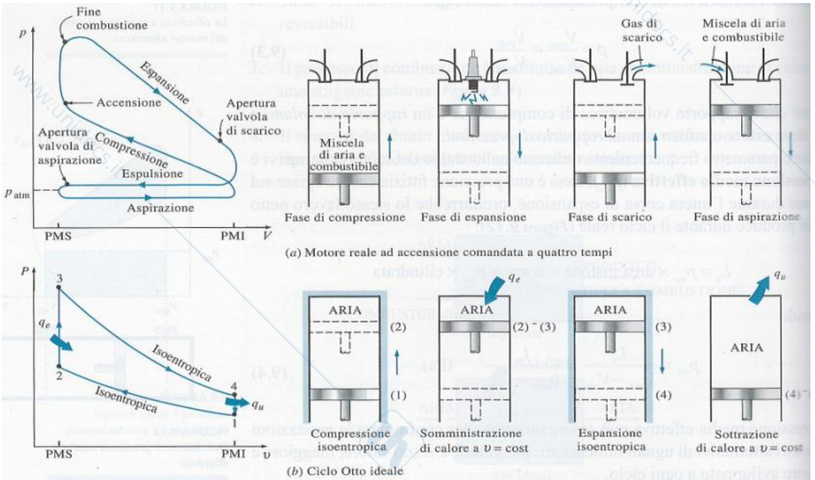
CICLI AD ARIA STANDARD

Tutti i motori a combustione interna sono dei cicli a circuito aperto, per permettere il riciclo dell'aria dov'è avvenuta la combustione.
Poiché i cicli diretti a gas che vengono realmente eseguiti nei motori sono piuttosto complessi, come semplificazione si fa riferimento ai cicli ad aria standard, caratterizzati dalle seguenti approssimazioni:

1. Il fluido evolvente è aria che circola continuamente in un circuito chiuso comportandosi come un gas perfetto, con calori specifici assunti costanti, valutati a *temperatura ambiente* (25°C).
2. Tutte le trasformazioni che costituiscono il ciclo sono internamente reversibili.
3. Il processo di combustione è sostituito da una somministrazione di calore da una sorgente esterna.
4. Il rinnovo del fluido evolvente è sostituito da una sottrazione di calore che ripristina il fluido evolvente nello stato iniziale.

CICLO OTTO

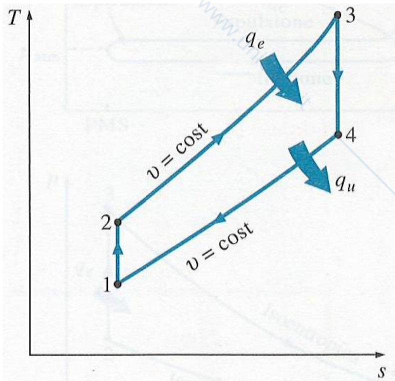
Utilizzato nei motori benzina ad accensione comandata.



Nei motori a 2 tempi, le 4 fasi sopra descritte si compiono in due sole corse del pistone, quella di compressione e quella di aspirazione.

Il ciclo Otto ideale ad aria standard consiste in 4 trasformazioni **internamente reversibili**:

1. Compressione isoentropica.
2. Somministrazione di calore a *volume specifico* costante.
3. Espansione isoentropica.
4. Sottrazione di calore a volume specifico costante.



Il ciclo Otto ideale sul diagramma *T-s*.

Poiché viene eseguito su un sistema chiuso, l'eq. del 1 principio della termodinamica diventa: $\Delta u = q - l = [J/kg]$.

Inoltre non scambia lavoro durante le due trasformazioni di scambio termico, poiché esse avvengono a volume specifico costante, quindi:

$$q_e = q_{23} = u_3 - u_2 = c_v(T_3 - T_2)$$

$$q_u = -q_{41} = -(u_1 - u_4) = c_v(T_4 - T_1)$$

RENDIMENTO DEL CICLO OTTO

$$\eta_{t,Otto} = \frac{l_n}{q_e} = 1 - \frac{q_u}{q_e} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)}$$

Tenendo presente che le trasformazioni 1-2 e 3-4 sono isentropiche e che, inoltre, risulta $v_2 = v_3$ e $v_4 = v_1$, si ottiene:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{k-1} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{k-1} = \frac{T_4}{T_3}$$

Sostituendo nell'equazione del rendimento troviamo:

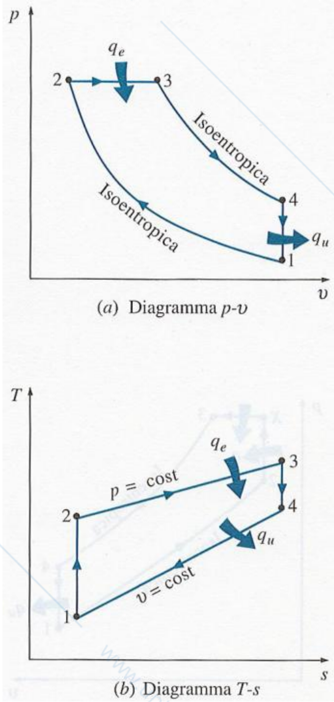
$$\eta_{t,Otto} = 1 - \frac{1}{\rho^{k-1}}$$

$$\rho = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

CICLO DIESEL

E’ il ciclo ideale dei motori alternativi ad accensione spontanea.
E’ costituito da 4 trasformazioni, le quali differiscono dal ciclo Otto soltanto per il secondo punto:

1. Compressione isoentropica.
2. Somministrazione di calore a *pressione* costante.
3. Espansione isoentropica.
4. Sottrazione di calore a volume specifico costante.



(a) Diagramma p-v

(b) Diagramma T-s

$$q_e = q_{23} = l_{23} + (\Delta u)_{23}$$
$$= p_2(v_3 - v_2) + (u_3 - u_2)$$
$$= h_3 - h_2 = c_p(T_3 - T_2)$$

$$q_u = -q_{41} = -l_{41} - (\Delta u)_{41} = u_4 - u_1$$
$$= c_v(T_4 - T_1)$$

Definiamo il **rapporto volumetrico di introduzione τ** come il rapporto tra i volumi del cilindro alla fine e all’inizio del processo di somministrazione di calore:

$$\tau = \frac{V_3}{V_2} = \frac{v_3}{v_2}$$

RENDIMENTO DEL CICLO DIESEL

$$\eta_{t,Diesel} = \frac{l_n}{q_e} = 1 - \frac{q_u}{q_e} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{k(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{kT_2(T_3/T_2 - 1)}$$

Tenendo conto che per un gas perfetto le trasformazioni isoentropiche come la 1-2 e la 3-4, sono politropiche di esponente k, il rendimento termico si riduce all’espressione:

$$\eta_{t,Diesel} = 1 - \frac{1}{\rho^{k-1}}\left[\frac{\tau^k - 1}{k(\tau - 1)}\right]$$

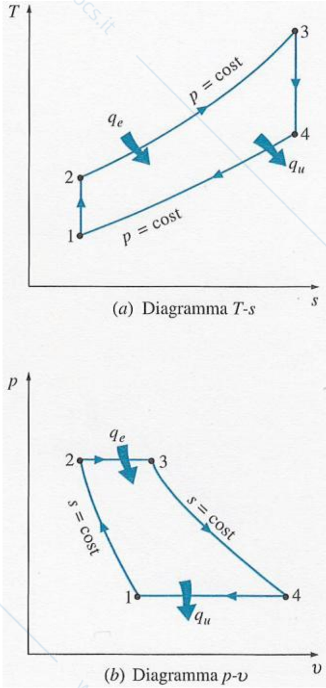
A parità di rapporto volumetrico di compressione ρ, risulta:

$$\eta_{t,Diesel} < \eta_{t,Otto}$$

CICLO BRAYTON

E' il ciclo ideale degli impianti a turbina a gas.
Composto da 4 fasi:

1. Compressione isoentropica.
2. Somministrazione di calore a pressione costante.
3. Espansione isoentropica.
4. Sottrazione di calore a pressione costante.



Le trasformazioni sono realizzate con dispositivi schematizzabili come **sistemi aperti a flusso stazionario**.
Quando le variazioni di energia cinetica e dell'energia potenziale sono trascurabili, l'eq. del 1 principio della termodinamica per i sistemi aperti a flusso stazionario, riferita all'unità di massa, diventa:

$$\Delta h = q - l$$

Assumendo i calori specifici costanti, valutati a temperatura ambiente, così come richiesto dalle assunzioni del ciclo ad aria standard, le quantità di calore scambiate dal fluido evolvente risultano:

$$q_e = q_{23} = h_3 - h_2 = c_p(T_3 - T_2)$$

$$q_u = -q_{41} = h_4 - h_1 = c_p(T_4 - T_1)$$

RENDIMENTO DEL CICLO BRAYTON

$$\eta_{t,Brayton} = \frac{l_n}{q_e} = 1 - \frac{q_u}{q_e} = 1 - \frac{c_p(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)}$$

Tenendo presente che le trasformazioni 1-2 e 3-4 sono isoentropiche e che $p_2 = p_3$ e $p_4 = p_1$, si può scrivere:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(k-1)/k} = \left(\frac{p_3}{p_4}\right)^{(k-1)/k} = \frac{T_3}{T_4}$$

Sostituendo nell'equazione del rendimento troviamo:

$$\eta_{t,Brayton} = 1 - \frac{1}{\beta^{(k-1)/k}}$$

$$\beta = \frac{p_2}{p_1}$$

β è il **rapporto manometrico di compressione**.