

ACCADEMIA NAVALE
1° ANNO CORSO APPLICATIVO GENIO NAVALE

CORSO DI
IMPIANTI DI PROPULSIONE NAVALE

Lezione 05

Motori a combustione interna
parte B

A.A. 2011 /2012

Prof. Flavio Balsamo

La sovralimentazione

Nello studio delle macchine le grandezze da massimizzare sono la potenza erogabile e il rendimento; la sovralimentazione ha come scopo l'incremento del primo termine.

Dalla espressione della potenza si nota come sia molto importante la quantità di aria con cui si riesce a riempire il cilindro prima che cominci la fase di compressione

$$P = V \frac{n}{60 \varepsilon} \frac{\delta_a \lambda_v}{\alpha} H_i \eta_g \quad \text{ove} \quad \lambda_v = \frac{m_a}{V \delta_a}$$

infatti, assegnato un certo valore del rapporto aria-combustibile α , incrementando la quantità di aria effettivamente introdotta nel cilindro, espressa tramite il coefficiente di riempimento λ_v , si incrementa la quantità di combustibile bruciata.

Si è anche visto come il coefficiente di riempimento è normalmente minore dell'unità per l'insorgere di una serie di problematiche, ma che esso è influenzato dalla pressione dell'aria nel condotto di aspirazione.

Ove fosse possibile aumentare tale valore si otterrebbero benefici in termini di aria introdotta nel cilindro e quindi di potenza erogabile.

Motori a combustione interna 02

La sovralimentazione

Per elevare la pressione in corrispondenza della valvola di aspirazione del motore è necessario comprimere in qualche maniera l'aria.

A tale scopo è possibile utilizzare differenti tipi di compressori, volumetrici o centrifughi, alternativi o rotativi.

è possibile inoltre utilizzare differenti fonti di energia per azionare il compressore:

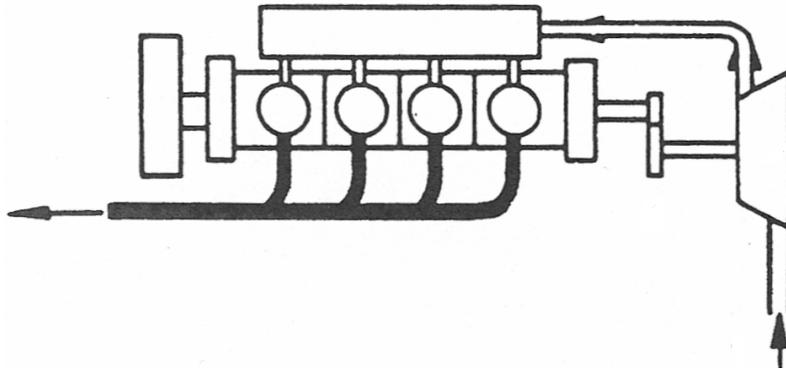
- l'energia disponibile all'albero del motore stesso, collegandovi direttamente il compressore; in questo caso si parlerà di sovralimentazione meccanica.
- l'energia contenuta nei gas di scarico del motore, raccolta da una turbina che collegata direttamente al compressore; in questo caso si parlerà di sovralimentazione con turbocompressore a gas di scarico.
- una sorgente esterna al motore, ad esempio un compressore azionato da un motore elettrico.

In alcune applicazioni è possibile che venga utilizzata più di un sistema di sovralimentazione tra quelli esposti.

È inoltre possibile ottenere un aumento della quantità di aria in ingresso al motore con dispositivi particolari, in grado di creare onde di pressione nei condotti.

Motori a combustione interna

La sovralimentazione meccanica

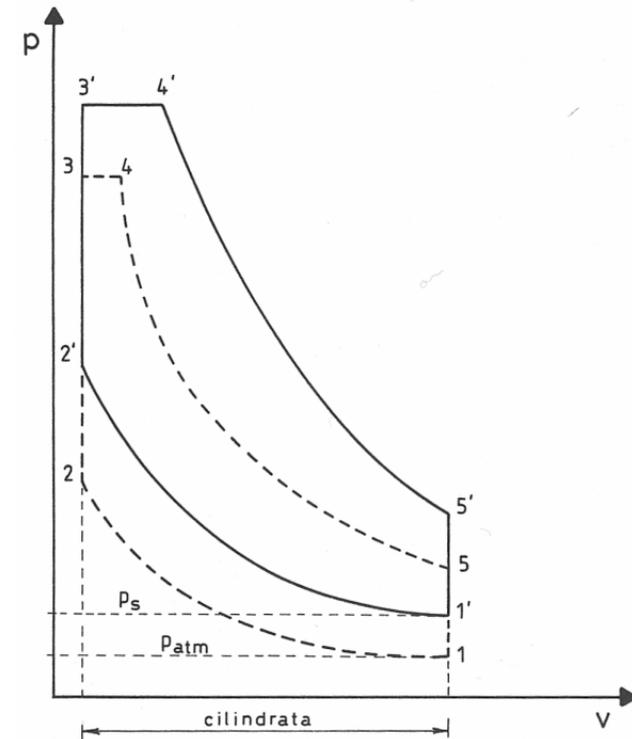


Nella sovralimentazione meccanica il compressore è collegato all'asse tramite un riduttore, per cui aspira aria dall'esterno e la invia ai cilindri.

Poiché il coefficiente di riempimento dei cilindri dipende dalla pressione dell'aria a monte della valvola di aspirazione, a parità di α (rapporto aria-combustibile) sarà possibile bruciare una maggiore quantità di combustibile.

Il ciclo sarà caratterizzato da una temperatura e da una pressione massima più alte del corrispondente ciclo aspirato a parità di cilindrata, dato che si è realizzata una maggiore adduzione di calore.

Si constata inoltre che, come ci si attendeva, l'area del ciclo è maggiore, segno che un lavoro più grande è stato prodotto.



Motori a combustione interna

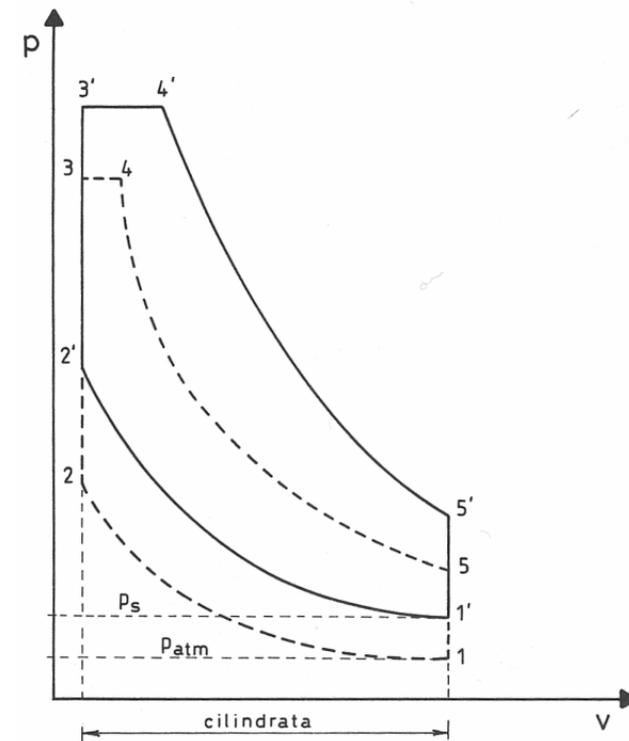
La sovralimentazione meccanica

Nella sovralimentazione meccanica parte dell'incremento di lavoro ottenuto serve per azionare il compressore e comprimere l'aria.

Inoltre si può notare come risultano aumentate anche pressione e temperatura dei gas al momento dello scarico, e quindi si è incrementato anche il calore dissipato all'esterno attraverso i gas esausti.

Il lavoro richiesto per comprimere l'aria dalla pressione p_{atm} , che si ha nel punto 1 alla pressione 1' di inizio della fase di compressione è pari alla corrispondente variazione di entalpia totale, ovvero di quella che tiene conto anche della presenza del termine cinetico.

Infatti il compressore, oltre ad incrementare l'entalpia del fluido, gli fornisce energia cinetica accelerandolo; mentre in altri tipi di macchine (TG) tale energia cinetica viene comunque utilizzata per produrre lavoro negli stadi successivi, in questo caso viene dissipata dato che il fluido entra in un collettore in cui si trova praticamente in quiete.



Motori a combustione interna

La sovralimentazione meccanica

$$-L_{1,1'} = m(h_{1'} - h_1)$$

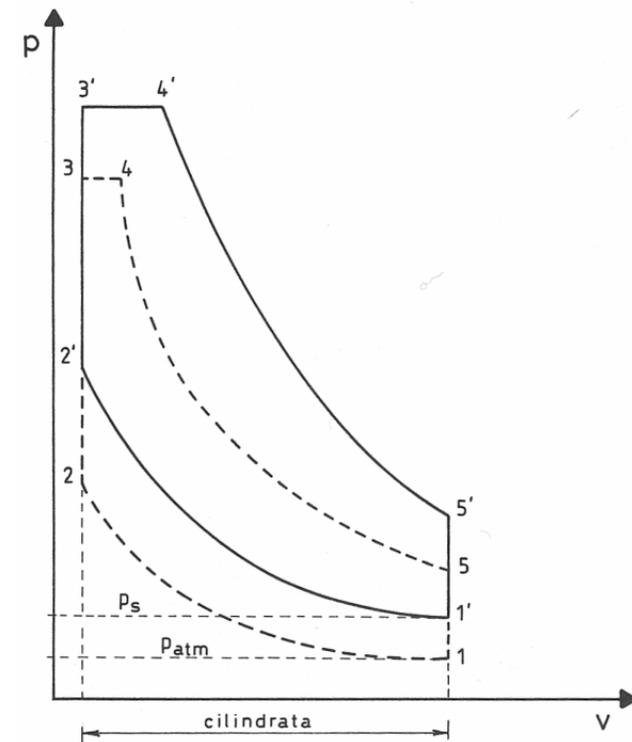
$$L_{1,1'} = \frac{1}{\eta_c} m c_{p,a} T_1 \left[\left(\frac{p_{1'}}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

Per ottenere il lavoro reale di compressione è necessario tener presente anche il rendimento meccanico, oltre a quello adiabatico di compressione.

$$L_{1,1'} = \frac{1}{\eta_m} \frac{1}{\eta_c} m c_{p,a} T_1 \left[\left(\frac{p_{1'}}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

In conclusione la sovralimentazione meccanica consente di ottenere, a parità di cilindrata, un incremento di potenza, sempre che l'energia richiesta dal compressore non sia tale da vanificare i benefici ottenuti.

A tale proposito sono importanti i valori del rendimento meccanico e del rendimento adiabatico del compressore

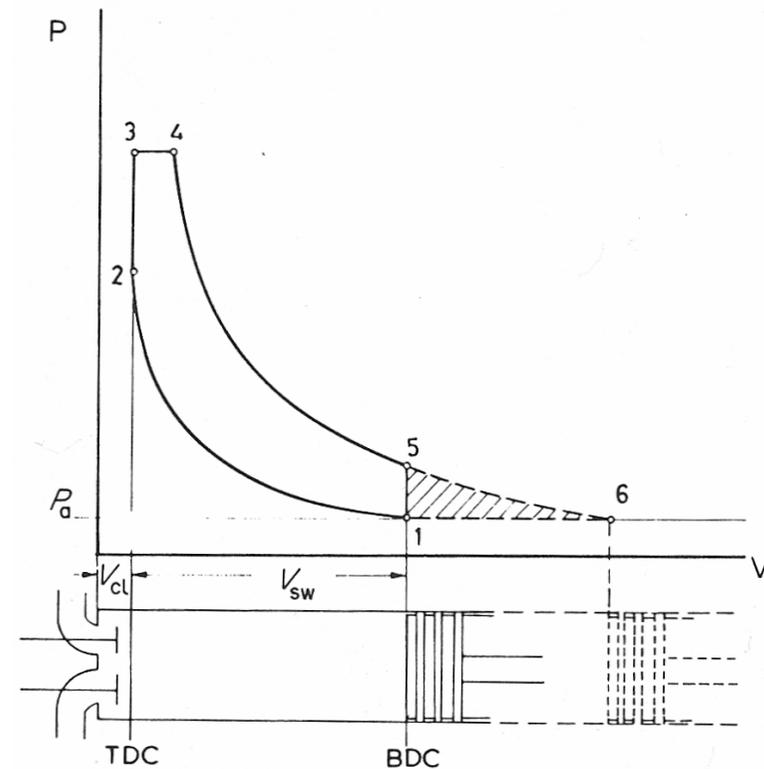


Motori a combustione interna

Nel ciclo semplice, poiché la corsa del pistone deve necessariamente terminare al punto morto inferiore, i gas in espansione abbandonano il cilindro prima di aver compiuto tutto il lavoro che avrebbero potuto fornire e per di più con una elevata temperatura ed una pressione maggiore di quella atmosferica.

L'entità di questa energia dispersa nell'ambiente si può valutare considerando, chiaramente in maniera fittizia, il pistone capace di proseguire la sua corsa finché i gas raggiungono la pressione atmosferica. L'area 1-5-6 rappresenta tale lavoro.

È allora possibile utilizzare per la compressione dell'aria non il lavoro meccanico prelevato all'asse ma l'energia contenuta nei gas di scarico, facendoli espandere in una turbina.

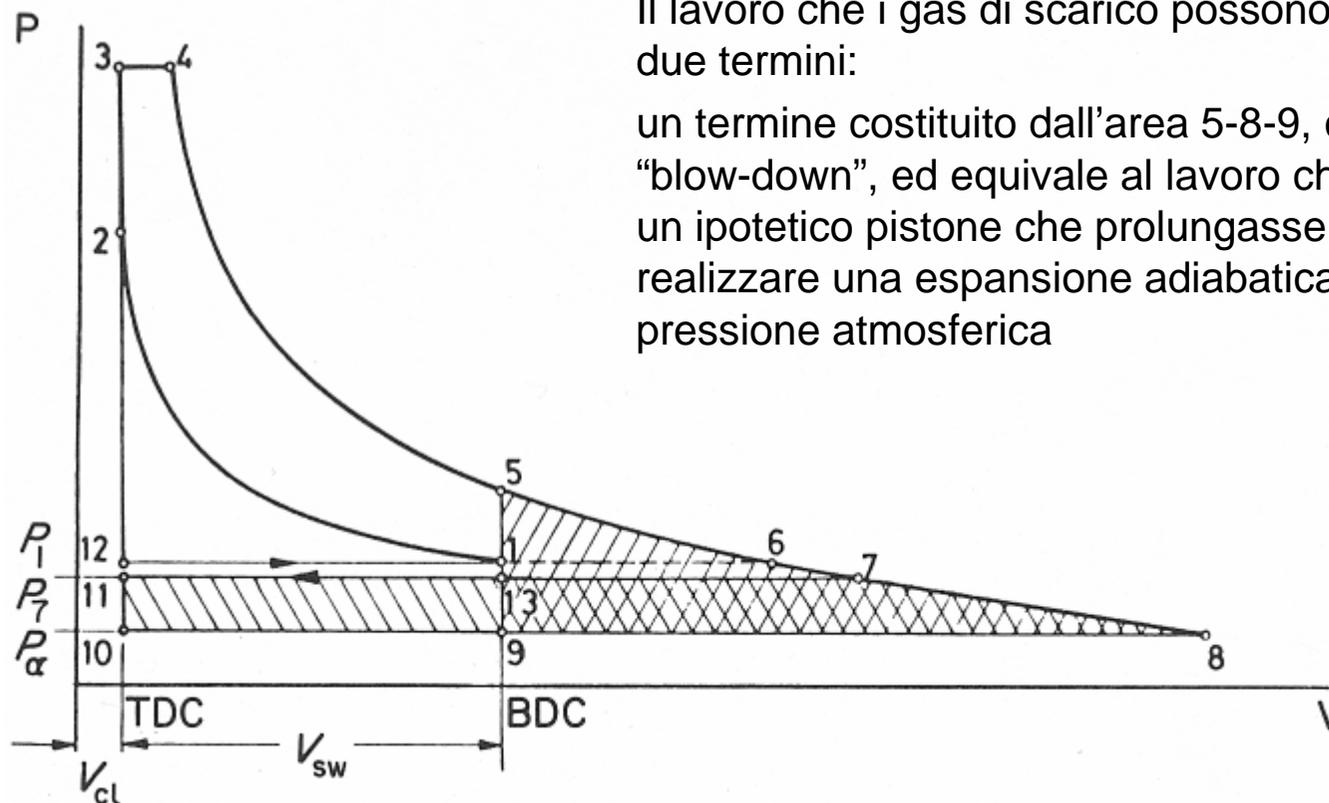


Motori a combustione interna

Nel ciclo sovralimentato il diagramma si ritrova traslato verso l'alto;

In questo caso il lavoro che i gas di scarico possono compiere risulta maggiore rispetto al caso precedente, senza sovralimentazione, dato che la pressione a cui essi si trovano alla fine della espansione si è notevolmente incrementata, per effetto della maggiore quantità di calore addotta.

Inoltre all'inizio della compressione l'aria contenuta nel cilindro si trova alla pressione p_1 , maggiore di quella atmosferica p_{atm} , per effetto del compressore.



Il lavoro che i gas di scarico possono compiere è somma di due termini:

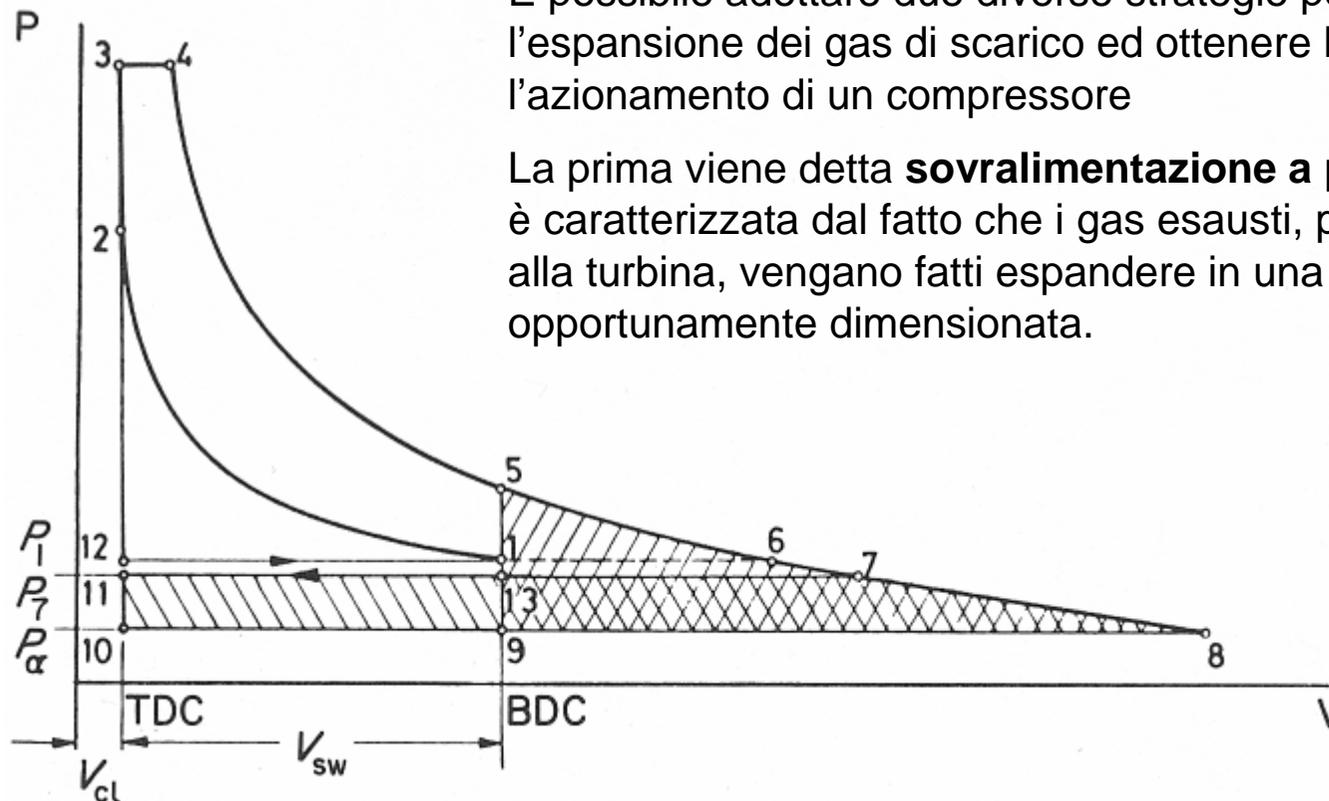
un termine costituito dall'area 5-8-9, che viene chiamato "blow-down", ed equivale al lavoro che potrebbe compiere un ipotetico pistone che prolungasse la sua corsa e realizzare una espansione adiabatica reversibile sino alla pressione atmosferica

Motori a combustione interna

Un secondo termine è invece dovuto al fatto che i gas esausti possono compiere ulteriore lavoro trovandosi a pressione più alta di quella atmosferica; tale lavoro è pari all'area 13-9-10-11.

In definitiva il massimo lavoro eseguibile dal fluido a partire dalle condizioni di fine espansione, pressione p_5 e T_5 , è dato dall'area comunque tratteggiata (5-8-10-11-13).

Tuttavia questa energia che i gas esausti posseggono non è completamente trasformabile in lavoro utile nella realtà

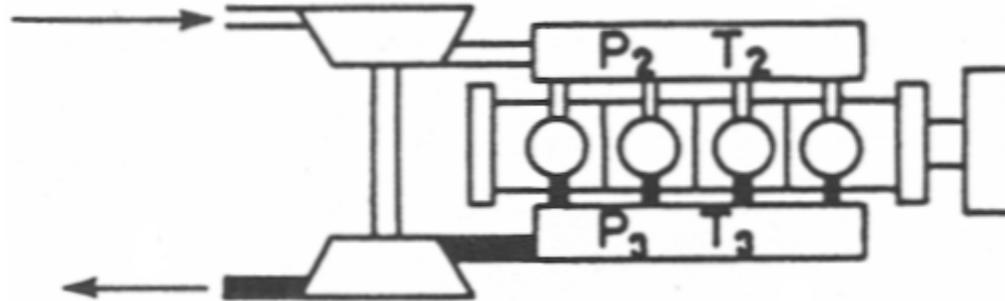


È possibile adottare due diverse strategie per realizzare l'espansione dei gas di scarico ed ottenere lavoro utile per l'azionamento di un compressore

La prima viene detta **sovralimentazione a pressione costante** ed è caratterizzata dal fatto che i gas esausti, prima di essere inviati alla turbina, vengano fatti espandere in una capacità opportunamente dimensionata.

Motori a combustione interna

Sovralimentazione a pressione costante



Nel sistema di sovralimentazione a pressione costante, tutti gli scarichi dei cilindri vengono inviati, tramite condotti di scarico molto corti, ad un collettore che alimenta la turbina.

Se le dimensioni del collettore di scarico sono state opportunamente scelte, le condizioni di pressione variabile che si hanno all'uscita dei singoli cilindri si trasformano in pressione costante. Si ha il vantaggio di poter usare, se ritenuto opportuno, anche solo una singola turbina per gestire il flusso da più cilindri e di avere una maggiore libertà nella scelta della sua posizione.

Il principale vantaggio di questo tipo di sovralimentazione è che le condizioni del flusso all'ingresso in turbina sono costanti.

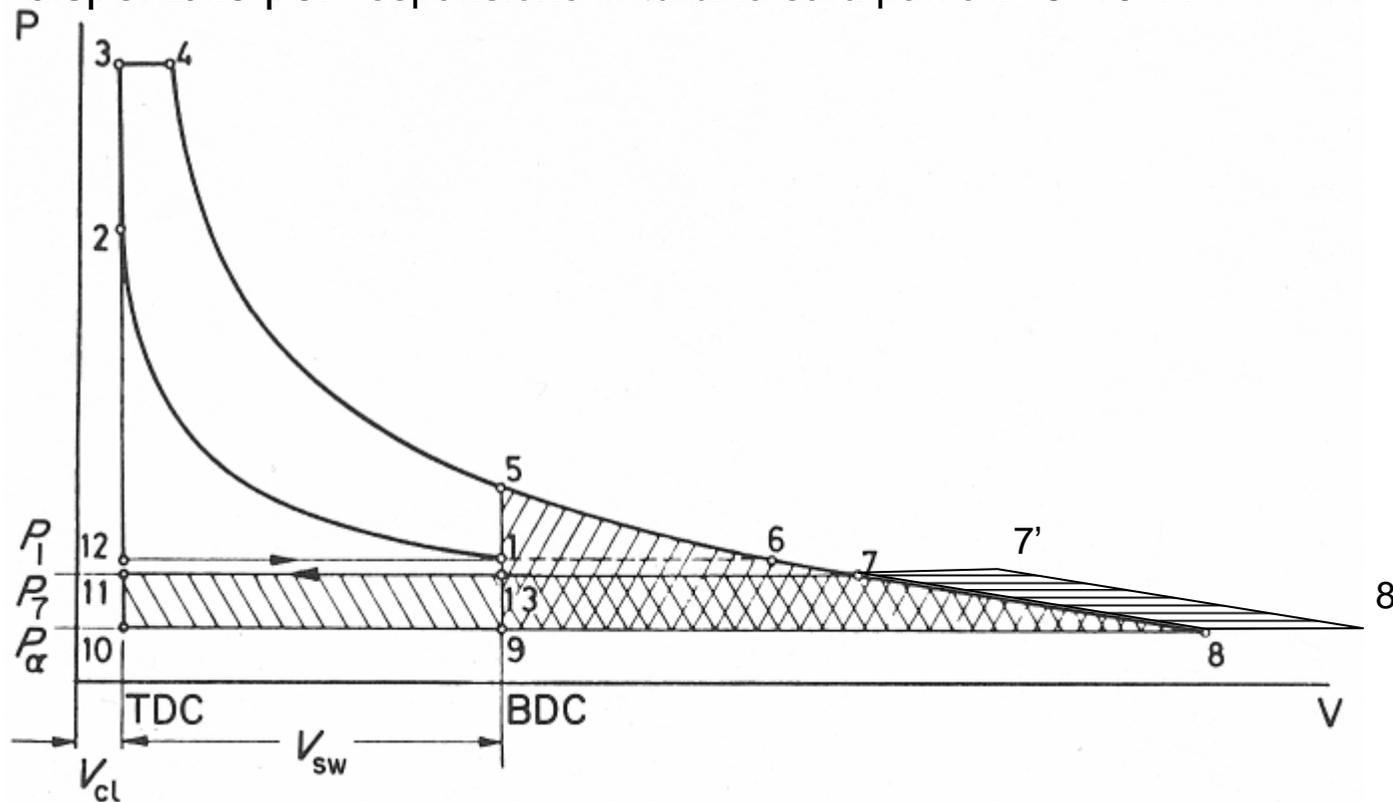
Motori a combustione interna

Sovralimentazione a pressione costante

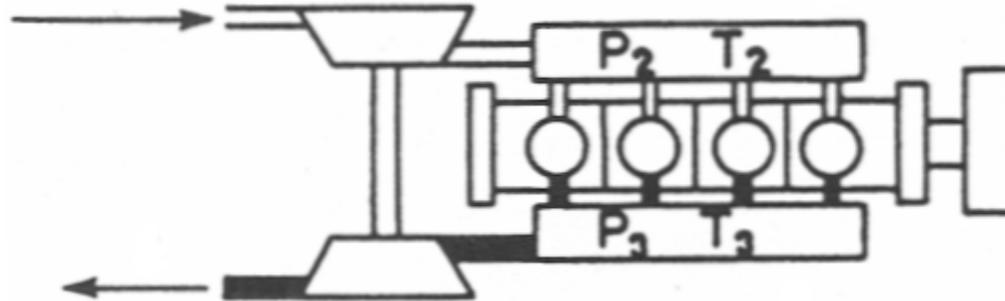
La pressione dei gas diminuirà da p_5 a p_7 ed inoltre l'energia cinetica che posseggono viene dissipata nel collettore, ove si ipotizza che il flusso sia fermo.

L'area individuata dai punti 5-7-13 rappresenta una energia dissipata (blowdown) che non potrà essere convertita in lavoro per il compressore.

Nella realtà l'energia di blow-down non va tutta dissipata, ma il moto turbolento che induce nel collettore ed i conseguenti attriti incrementano la temperatura del fluido, per cui il lavoro disponibile per l'espansione in turbina sarà pari a 7'-8'-10-11



Motori a combustione interna



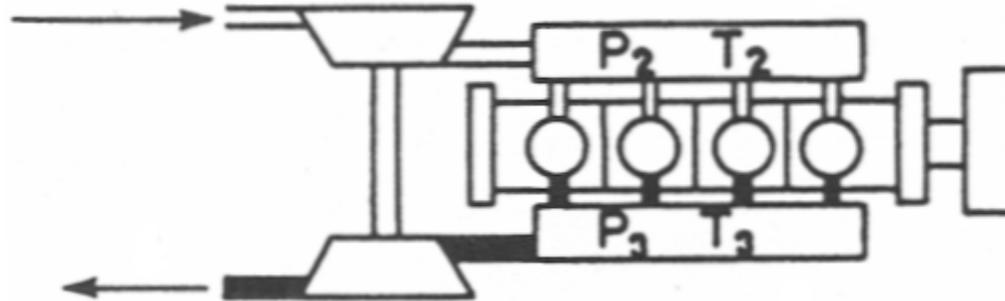
Il volume richiesto per realizzare le condizioni di pressione costante sarà dipendente dalla pressione a cui i singoli cilindri si trovano all'atto della apertura della valvola di scarico e dalla frequenza con cui vengono messi in comunicazione con il collettore, ovvero dalla velocità di rotazione e dal numero di tempi del motore e dal numero di cilindri da cui è costituito.

Anche la velocità con cui le valvole di scarico vengono aperte influenza le eventuali oscillazioni di pressione che si possono verificare all'interno del collettore.

In generale il collettore sarà da 1.5 a circa 6 volte la cilindrata complessiva del motore e tenderà ad essere più ampio nel caso di un numero di cilindri inferiore.

Normalmente il calore dissipato attraverso le superfici del collettore riduce l'energia disponibile alla turbina, per cui si tende a isolarlo.

Motori a combustione interna

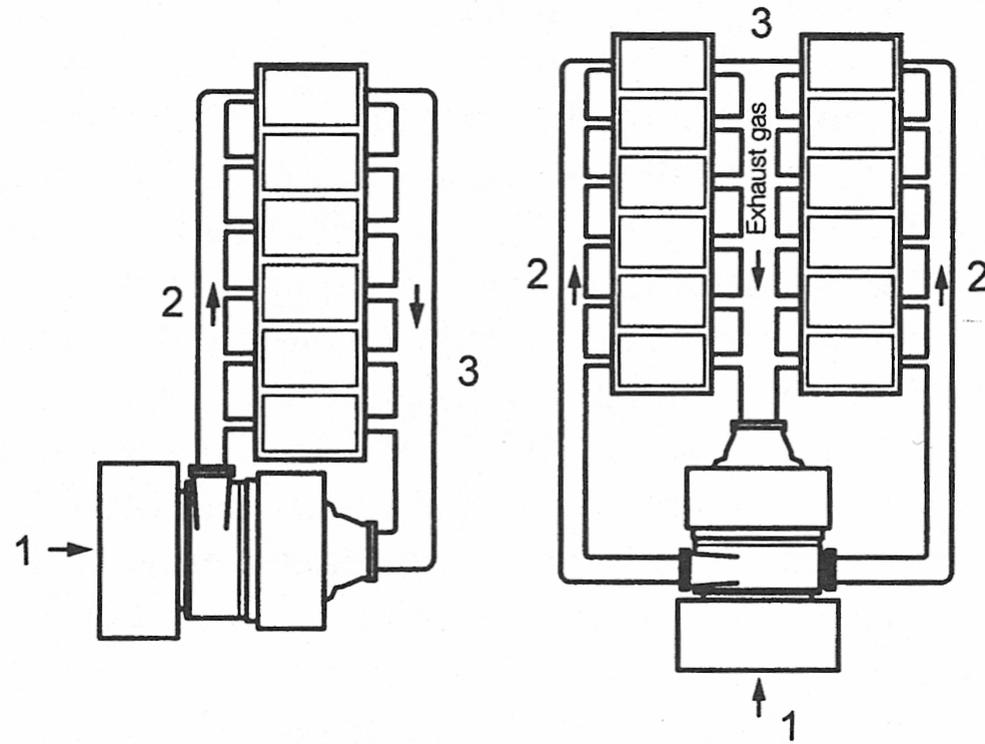


L'impiego di questo sistema è preferibile per motori di una certa dimensione, dato che per motori di piccola taglia la presenza del collettore di scarico determina un maggior ingombro complessivo.

Inoltre la risposta del motore alle variazioni di carico è influenzata dal ritardo con cui la pressione aumenta nel caso di collettore di grandi dimensioni.

Infine il condotto di scarico di ciascun cilindro non si trova connesso con un ambiente a pressione prossima a quella atmosferica, come accadeva per il motore aspirato, ma con un volume a pressione più alta (p_7), per cui si realizza una maggiore contropressione allo scarico.

Motori a combustione interna



Motori a combustione interna

Il lavoro realizzato dalla turbina nella espansione dalla pressione p_7 alla pressione atmosferica è pari a

$$L_{7,a} = \dot{m}_e c_{p,e} T_7 \left[1 - \left(\frac{p_a}{p_7} \right)^{\frac{k_e-1}{k_e}} \right] \eta_t \eta_m$$

La turbina è calettata sullo stesso asse del compressore, per cui le due macchine lavorano allo stesso numero di giri.

In condizioni di regime il lavoro prodotto dalla turbina deve essere uguale a quello assorbito dal compressore per cui, considerando un unico valore del rendimento meccanico, deve essere

$$L_{a,1} = L_{7,a}$$
$$\frac{1}{\eta_c} \dot{m}_a c_{p,a} T_1 \left[\left(\frac{p_1}{p_a} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] = \dot{m}_e c_{p,e} T_7 \left[1 - \left(\frac{p_a}{p_7} \right)^{\frac{k_e-1}{k_e}} \right] \eta_t \eta_m$$
$$\dot{m}_e = \dot{m}_a + \dot{m}_c \qquad \frac{\dot{m}_e}{\dot{m}_a} = 1 + \frac{1}{\alpha}$$

Motori a combustione interna

$$\left[\left(\frac{p_1}{p_a} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] = \left[1 - \left(\frac{p_a}{p_7} \right)^{\frac{k_e-1}{k_e}} \right] \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) \frac{c_{p,e}}{c_{p,a}} \frac{T_7}{T_1} \eta_c \eta_t \eta_m$$

Dall'analisi di questa relazione si vede come il valore della pressione di sovralimentazione p_1 dipende dalla pressione e temperatura dei gas di scarico e dal rendimento del gruppo turbocompressore

Allo scopo di individuare il compressore e la turbina in grado di realizzare le condizioni richieste in corrispondenza di una certa portata di gas del motore è necessario disporre delle curve caratteristiche che consentono di prevederne il comportamento.

Motori a combustione interna

I parametri che influenzano il comportamento di una macchina sono la pressione in ingresso e in uscita, la temperatura in ingresso, il numero di giri e una dimensione caratteristica della macchina, ad esempio il diametro, nonché i parametri fisici del fluido, quali la costante R , γ e la viscosità μ .

I parametri dipendenti da quelli elencati e che permettono di caratterizzare il funzionamento sono la portata di fluido elaborata dalla macchina, il rendimento e la temperatura del gas in uscita.

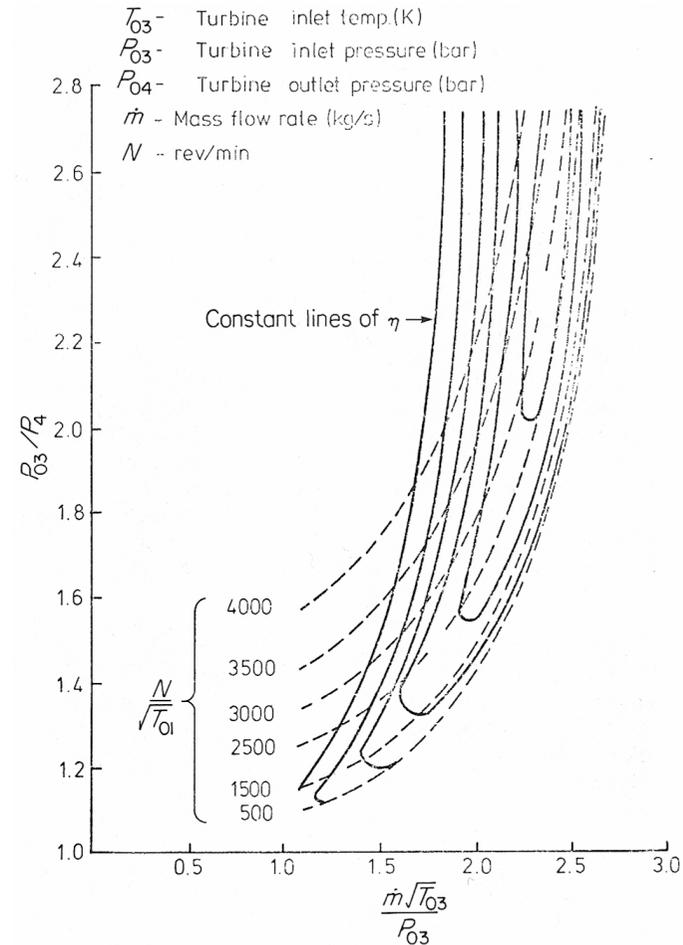
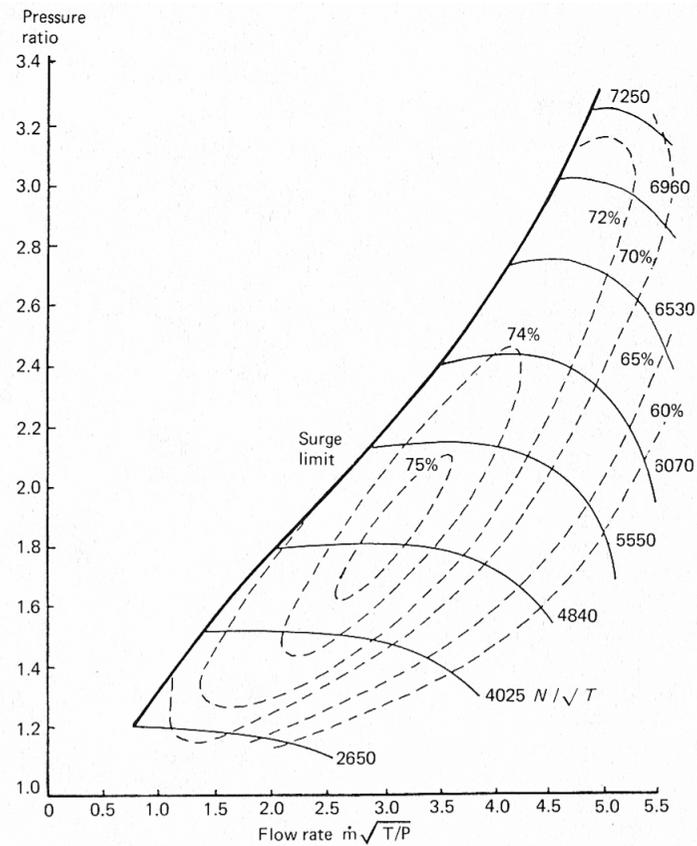
$$(\dot{m}, \eta, \Delta T_0) = f(p_{0,in}, p_{0,out}, T_{0,in}, n, D, R, \gamma, \mu)$$

Normalmente si introducono grandezze adimensionali, per cui gli otto parametri della relazione precedente si riducono a quattro gruppi adimensionali

$$\left(\frac{\dot{m} \sqrt{RT_{0,in}}}{p_{0,in} D^2}, \eta, \frac{\Delta T_0}{T_{0,in}} \right) = f \left(\frac{n D}{\sqrt{RT_{0,in}}}, \frac{p_{0,out}}{p_{0,in}}, \frac{\dot{m}}{\mu D}, \gamma \right)$$

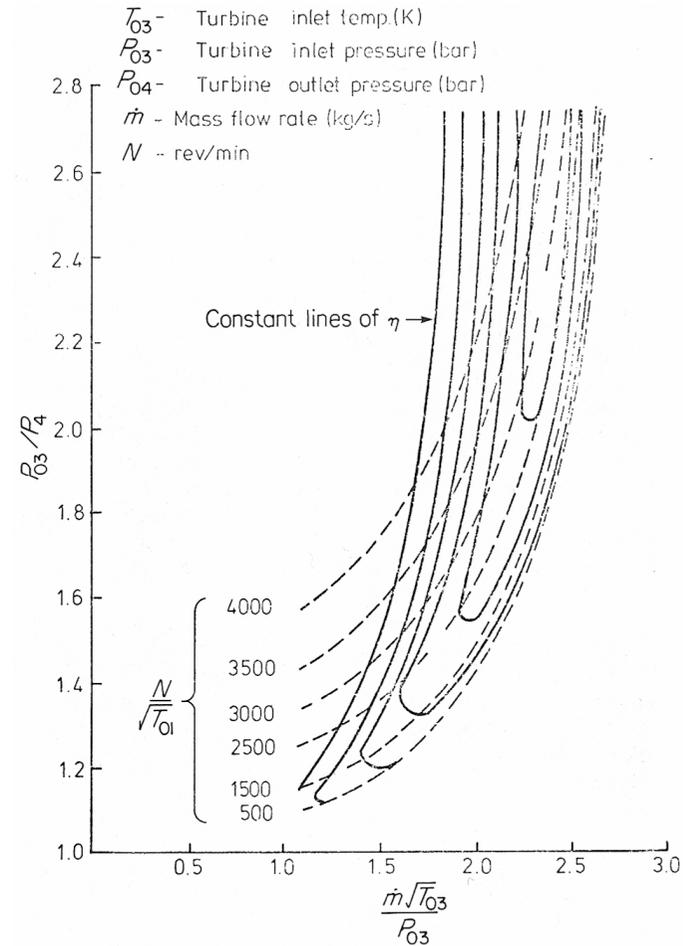
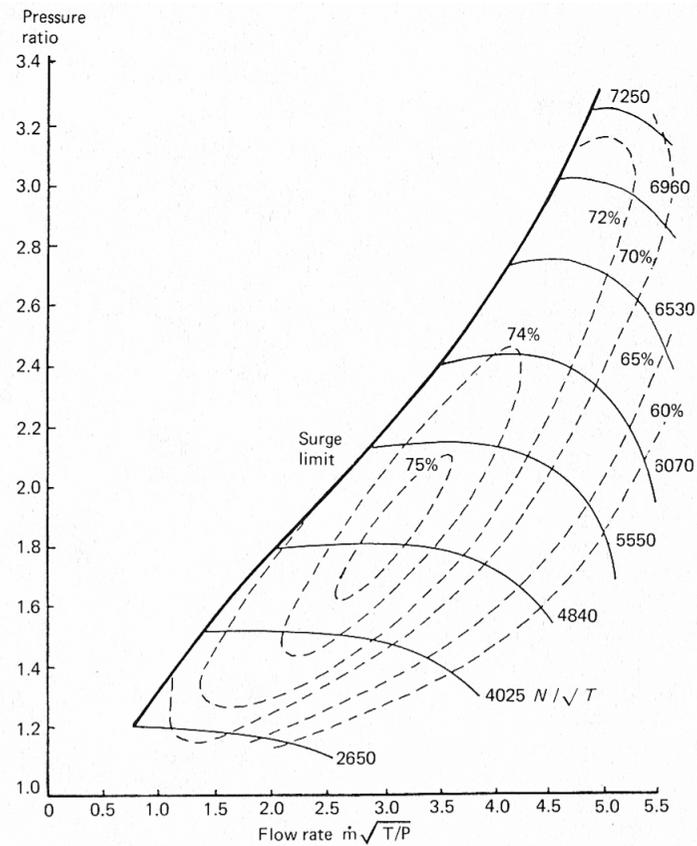
di cui i primi due sono in genere i più influenti.

Motori a combustione interna



Sono riportati i diagrammi caratteristici di un compressore e di una turbina; sebbene siano possibili rappresentazioni alternative, entrambi i grafici hanno sugli assi coordinati il flusso corretto e il rapporto di compressione/espansione mentre presentano curve a rendimento e numero di giri corretto costanti.

Motori a combustione interna

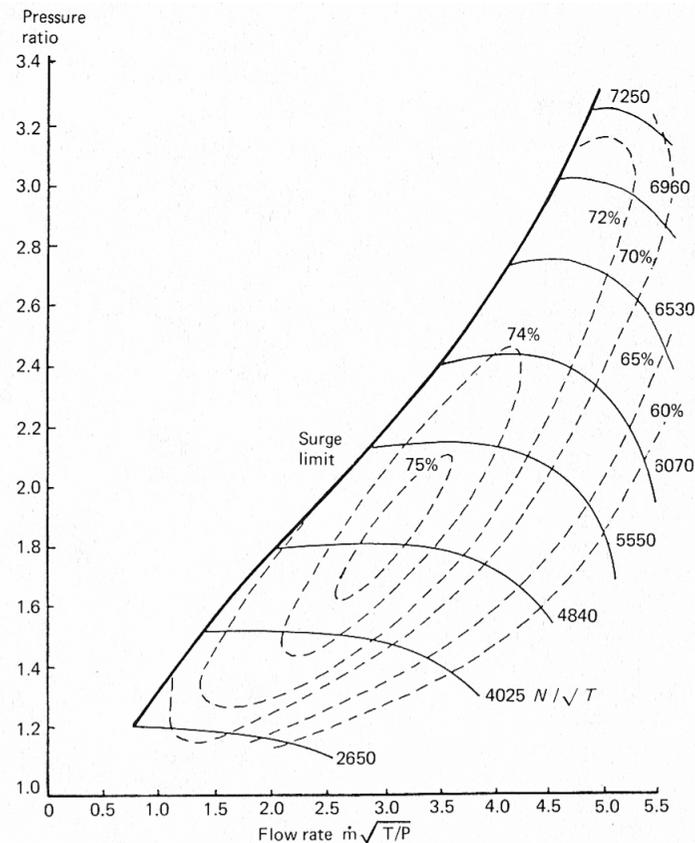


La portata ed il numero di giri corretto tengono conto del fatto che i diagrammi sono stati ottenuti per una certa temperatura ed una certa pressione di riferimento.

$$\dot{m}_{R,c} = \dot{m}_c \sqrt{\frac{T_1}{T_R}} \frac{p_R}{p_1}$$

$$n_{R,c} = n_c \sqrt{\frac{T_R}{T_1}}$$

Motori a combustione interna



Il diagramma caratteristico di un compressore presenta due zone di funzionamento, separate da una linea detta limite di surge.

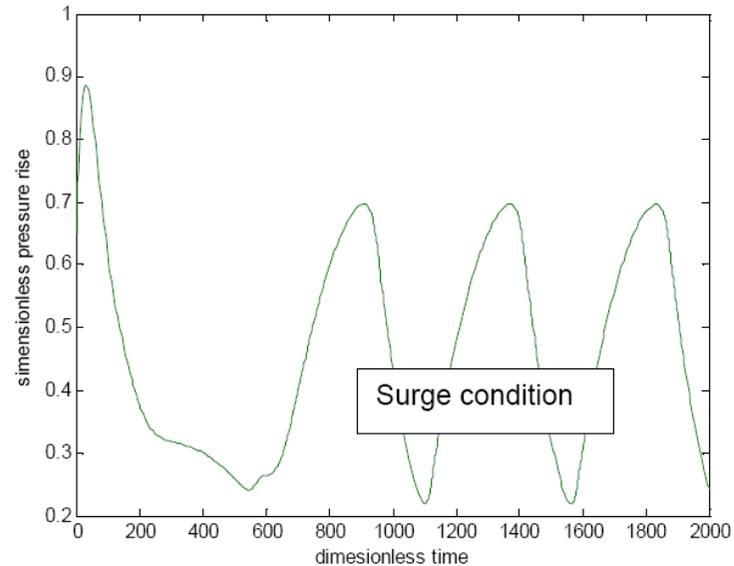
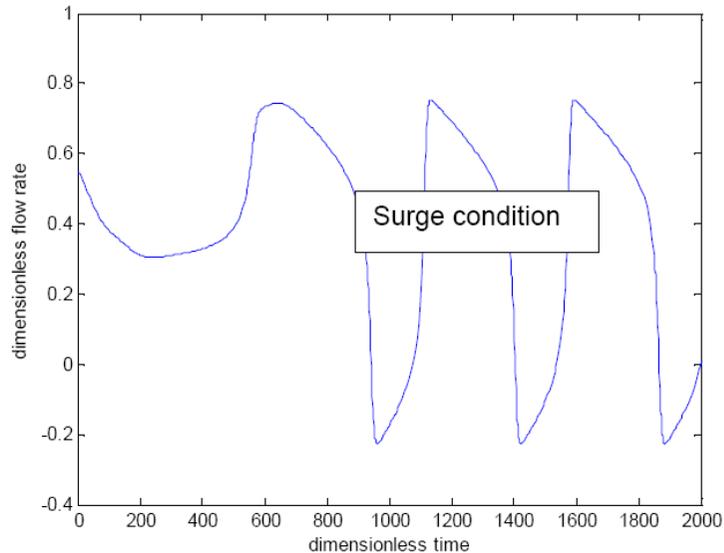
La zona a destra di detta linea presenta un funzionamento stabile, la zona a sinistra invece è caratterizzata da un flusso instabile e si verifica il fenomeno del pompaggio (surge).

Consiste nell'inversione temporanea del moto della corrente fluida che può rifluire verso l'aspirazione; il flusso tende a ristabilirsi temporaneamente dopo di che il fenomeno si ripresenta con cadenza di pochi Hertz.

Ciò avviene se per valori non elevati della portata a regime si verificano incrementi di pressione dettati dal circuito a valle del compressore, in questo caso dall'aspirazione del motore.

Tipico il caso in cui una diminuzione improvvisa del numero di giri (ad esempio a seguito di un crash stop) manda temporaneamente in surge il compressore dato che la pressione nel collettore di aspirazione tende a salire non essendo più richiesta aria dal motore.

Motori a combustione interna



Andamento della portata e della pressione in un turbosoffiante soggetta ad instabilità.

Tipico il caso in cui una diminuzione improvvisa del numero di giri (ad esempio a seguito di un crash stop) manda temporaneamente in surge il compressore dato che la pressione nel collettore di aspirazione tende a salire non essendo più richiesta aria dal motore.

Trattandosi di un fenomeno oscillatorio, oltre alla resistenza opposta dal circuito a valle ha importanza anche la capacità del circuito, costituita dal collettore di aspirazione.

Motori a combustione interna

La turbina ha meno problemi di stabilità, infatti variazioni di pressione causano variazioni di portata di minore entità rispetto al compressore.

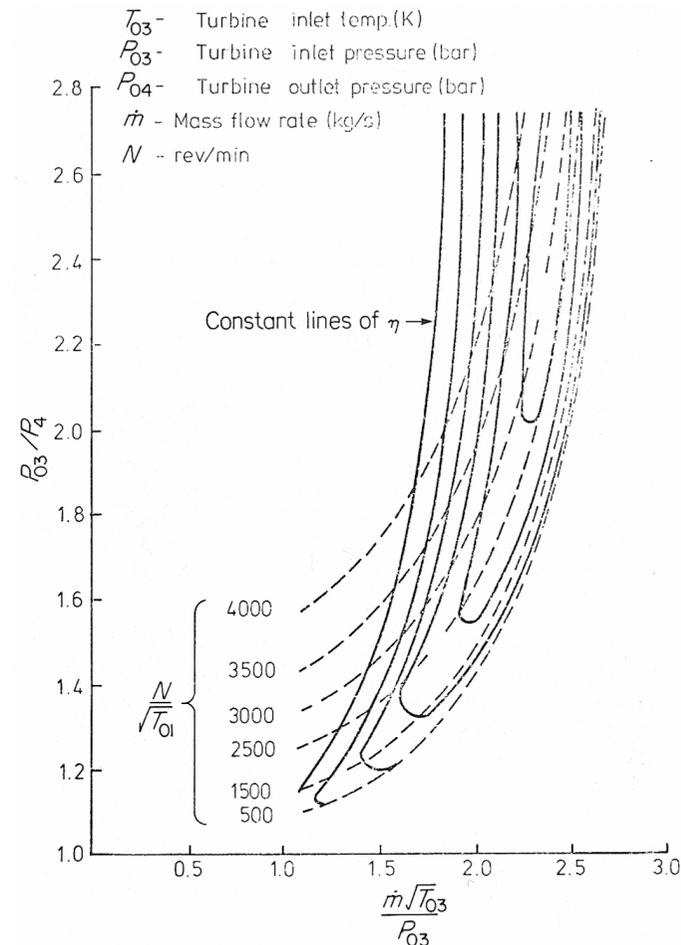
Ciò nondimeno dalla curva caratteristica tipica si può notare che la portata non aumenta oltre un certo valore nonostante si incrementi il salto di pressione disponibile.

Ciò accade quando la velocità dei gas nella macchina raggiunge quella del suono.

$$c = \sqrt{\gamma RT}$$

La condizione così individuata viene definita choking

I problemi legati alla turbina dipendono dallo stress termico cui è sottoposta



Motori a combustione interna

La scelta della turbosoffiante adeguata al tipo di motore è un problema molto complesso; come si è già visto in precedenza, l'obiettivo è quello di individuare un gruppo compressore-turbina in grado realizzare un incremento della portata di aria al motore a partire dai gas di scarico con un rendimento tale da non penalizzare il funzionamento globale.

Le due macchine sono accoppiate tramite la portata dei fluidi; la quantità di aria che entra nel motore è quella che attraversa il compressore, così come la quantità di gas di scarico che attraversa la turbina è quella prodotta dal motore. Inoltre queste due quantità sono poco differenti tra loro.

Fissata la potenza che si vuole ottenere dal motore, si può valutare la quantità di aria che deve alimentarlo, che potrà ottenersi con un certo grado di sovralimentazione.

Si individua così il punto di funzionamento del compressore, da cui si determina il lavoro richiesto che dovrà essere fornito dalla turbina, utilizzando il salto entalpico disponibile allo scarico del motore.

Applicando tale procedura iterativamente si converge ad una soluzione, che sarà valida per il regime di funzionamento del motore stabilito.

I problemi sorgono se il motore deve lavorare in condizioni differenti da quelle del punto di progetto; infatti il comportamento alle variazioni di carico del motore alternativo e della turbomacchina sono generalmente diverse tra loro.

Motori a combustione interna

Si analizzino le implicazioni sul rendimento di una variazione delle condizioni di carico per un motore alternativo (ipotizzato non sovralimentato, per correttezza di raffronto). Oltre alle perdite meccaniche, le principali fonti di degrado del rendimento sono costituite da:

- dissipazione attraverso la valvola di aspirazione, che aumenta all'aumentare della portata, ovvero del numero di giri

$$\dot{m}_a = \frac{\delta_a V}{\varepsilon} \lambda_v n$$

Le due macchine sono accoppiate tramite la portata dei fluidi; la quantità di aria che entra nel motore è quella che attraversa il compressore, così come la quantità di gas di scarico che attraversa la turbina è quella prodotta dal motore. Inoltre queste due quantità sono poco differenti tra loro.

Fissata la potenza che si vuole ottenere dal motore, si può valutare la quantità di aria che deve alimentarlo, che potrà ottenersi con un certo grado di sovralimentazione.

Fissata la potenza che si vuole ottenere dal motore, si può valutare la quantità di aria che deve alimentarlo, che potrà ottenersi con un certo grado di sovralimentazione.

Motori a combustione interna

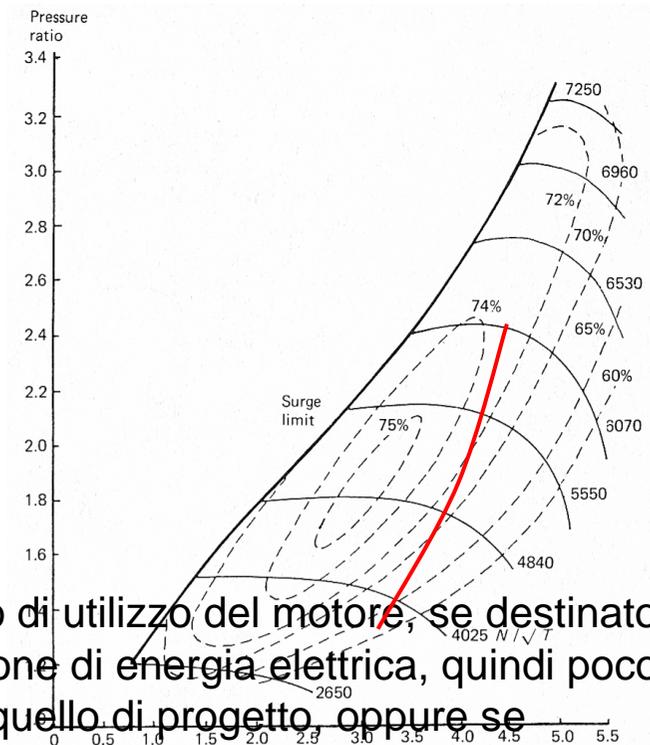
In un motore alternativo il rendimento è influenzato dalle perdite meccaniche, da quelle dovute agli attriti attraverso le luci di aspirazioni (per alte portate d'aria), quelle dovute ad una non ottimizzazione dell'apertura delle valvole fuori dal campo di velocità di progetto e da quelle generate da una combustione non ottimale che pure si realizza lontano dalle condizioni di progetto.

Per una turbomacchina invece il rendimento oltre che dagli attriti meccanici dipende soprattutto dall'andamento dei triangoli di velocità che si realizzano alle varie condizioni di funzionamento e dalle conseguenti condizioni di moto del fluido.

In un gruppo turbina-compressore per la sovralimentazione di un motore diesel la portata di fluido è determinata dal regime di funzionamento del motore e dalla potenza erogata, che a sua volta è dipendente dal regime di funzionamento della turbomacchina.

In un gruppo turbina-compressore per la sovralimentazione di un motore diesel la portata di fluido è determinata dal regime di funzionamento del motore e dalla potenza erogata, che a sua volta è dipendente dal regime di funzionamento della turbomacchina.

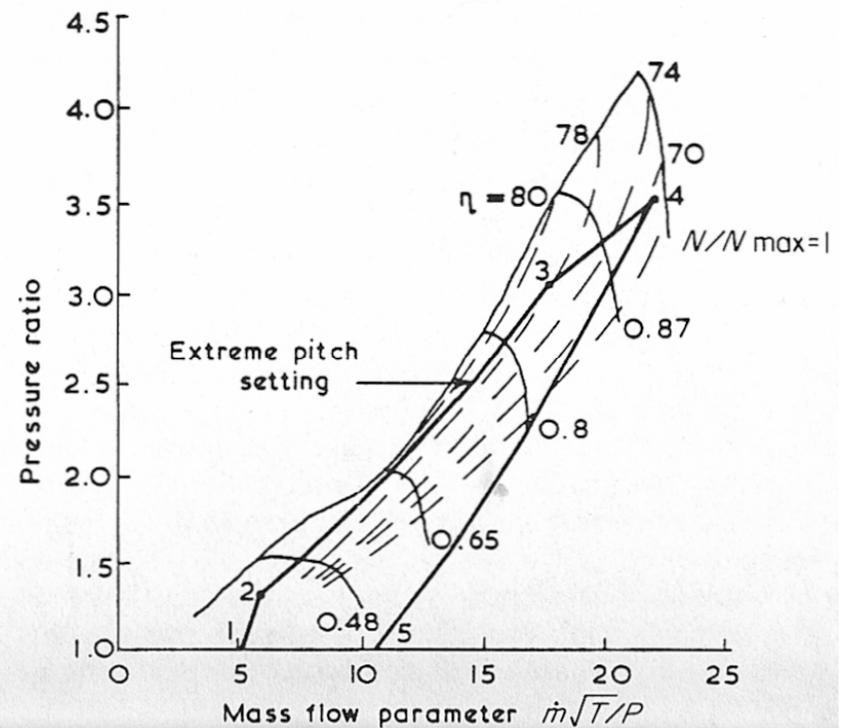
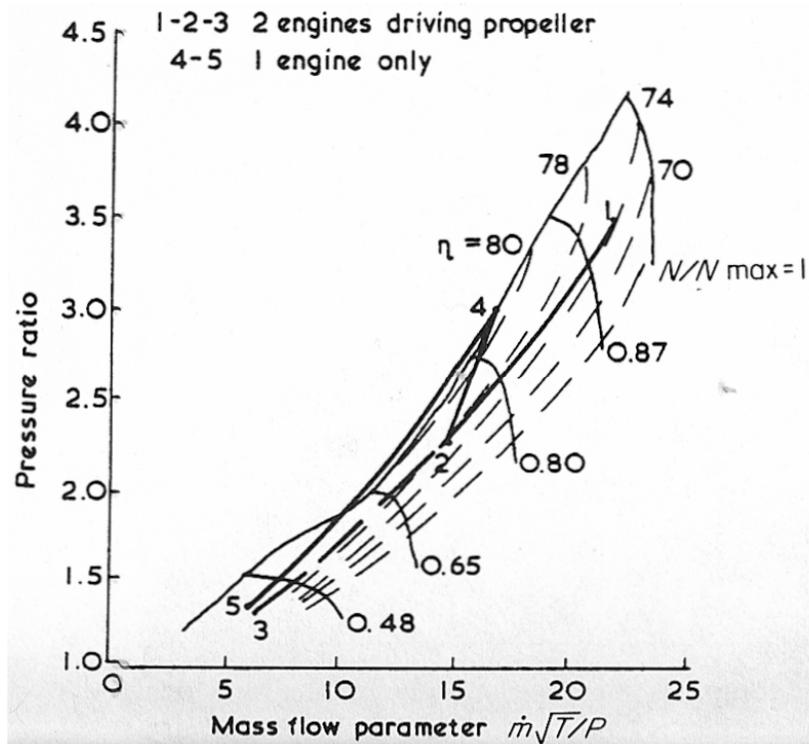
In particolare si presentano casi diversi a seconda del tipo di utilizzo del motore, se destinato alla propulsione a regime perlopiù costante o alla produzione di energia elettrica, quindi poco soggetto ad operare in punti di funzionamento lontani da quello di progetto, oppure se destinato a lavorare su imbarcazioni soggette a condizioni di lavoro continuamente variabili.



Motori a combustione interna

Il grafico che segue si riferisce alle curve di portata di aria richieste dal motore in funzione del carico costituito da un'elica a pale fisse azionata da due motori ed un'elica a pale orientabili. Si noti come nel caso in cui un unico motore sia costretto ad azionare l'elica la curva di portata si trova oltre la linea di surging.

Nel caso invece della propulsione con elica a pale orientabili si individua un involucro di possibili curve di elica e bisognerà prestare attenzione ad individuare la curva limite che non causi l'insorgere del surging.

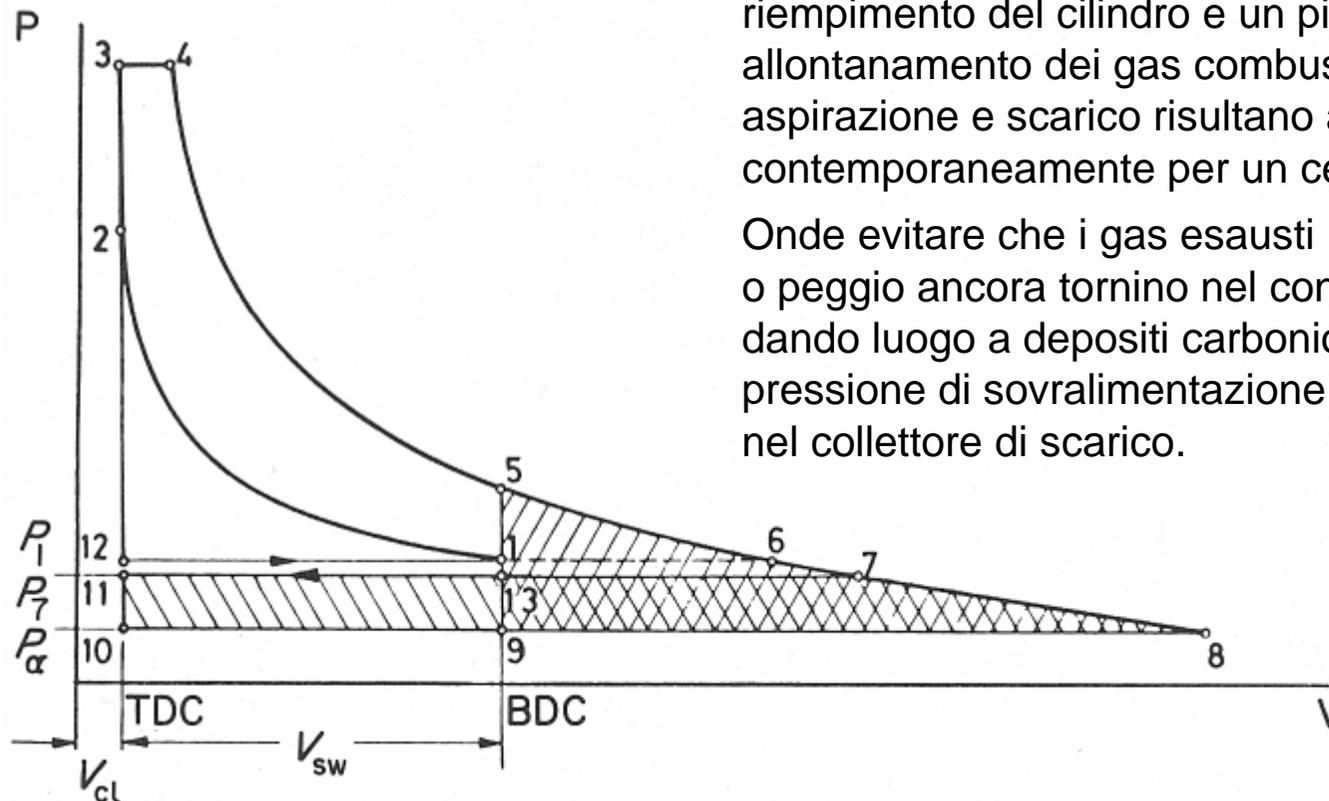


Motori a combustione interna

Allo scopo di visualizzare l'effetto del rapporto tra la pressione di sovralimentazione e quella dei gas di scarico sul motore, si noti come nella fase di aspirazione, 12->1, l'aria agisca spingendo il pistone verso il PMI compiendo il lavoro 10-12-1-9, mentre nella fase di scarico dei gas combusti il pistone debba vincere la pressione p_7 , compiendo il lavoro 10-11-13-9.

Il bilancio netto è costituito dall'area 11-12-1-13, che è in definitiva lavoro meccanico realizzato a spese del compressore, e quindi dei gas di scarico, e dipende appunto dai valori di p_1 e p_7 .

Generalmente, allo scopo di ottenere un miglior riempimento del cilindro e un più completo allontanamento dei gas combusti, le valvole di aspirazione e scarico risultano aperte contemporaneamente per un certo intervallo di tempo. Onde evitare che i gas esausti rimangano nel cilindro o peggio ancora tornino nel condotto di aspirazione dando luogo a depositi carboniosi, è necessario che la pressione di sovralimentazione sia maggiore di quella nel collettore di scarico.



Motori a combustione interna

Poiché nella relazione di equilibrio tra lavoro compiuto dal compressore e lavoro fornito dalla turbina compare anche la quantità di combustibile, è evidente che i valori di pressione all'aspirazione ed allo scarico dipendono dal carico cui è soggetto il motore.

La quantità di combustibile introdotta nel motore influenza decisamente anche la temperatura dei gas esausti, e quindi il lavoro eseguibile dalla turbina.

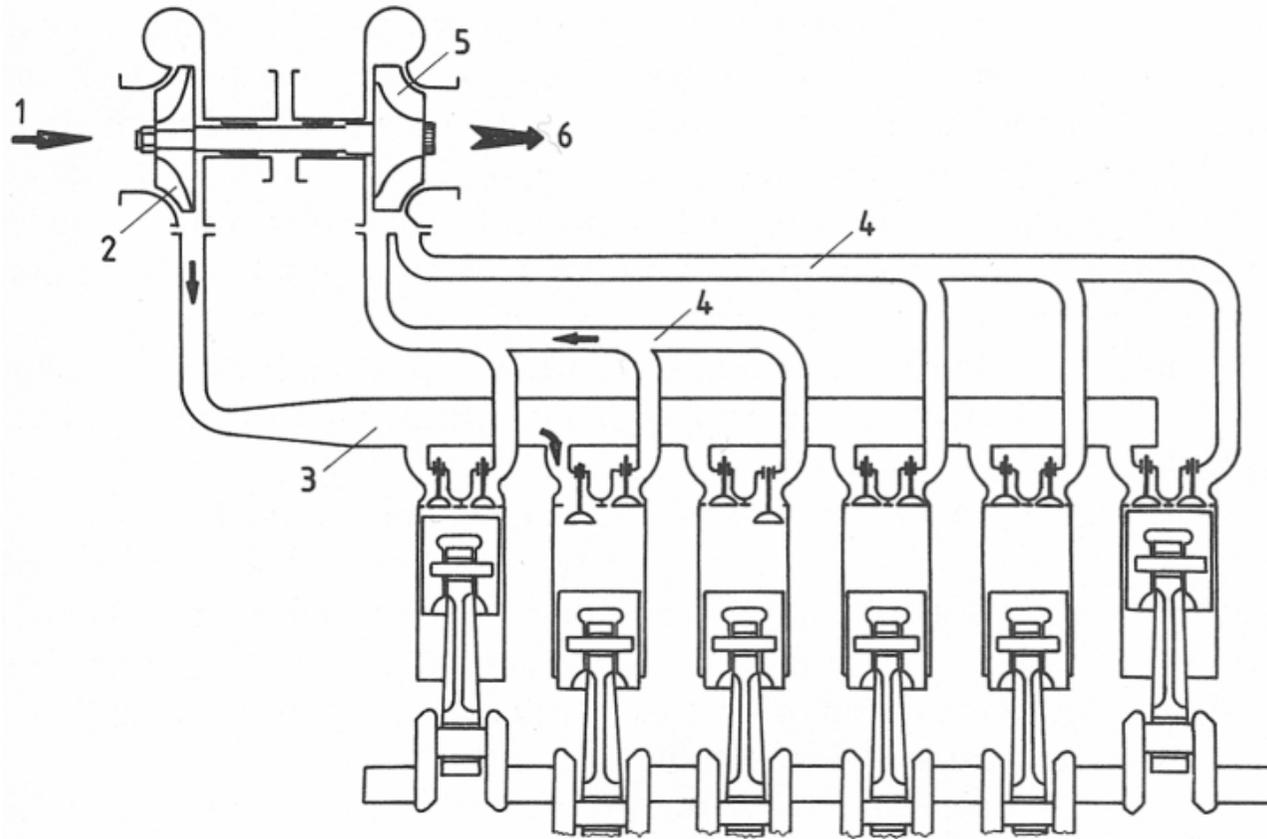
Quindi la diminuzione di temperatura dei gas esausti provocherà una diminuzione del salto ottenibile dal compressore e quindi della pressione di sovralimentazione.

Ciò condurrà ad un ulteriore abbassamento della temperatura dei gas esausti, giungendo ad una condizione di regime in cui pressione di sovralimentazione, temperatura di ingresso in turbina e portate di aria sono tutte a valori più bassi.

Se però il gruppo turbosoffiante presenta rendimenti scadenti per i nuovi valori di portate che si sono venute a creare, il sistema può non essere in grado di mantenere un accettabile grado di efficienza e il rendimento complessivo della macchina precipita.

In definitiva, per i motori che devono lavorare anche a carichi parziali il sistema di sovralimentazione a pressione costante presenta notevoli problemi.

Motori a combustione interna

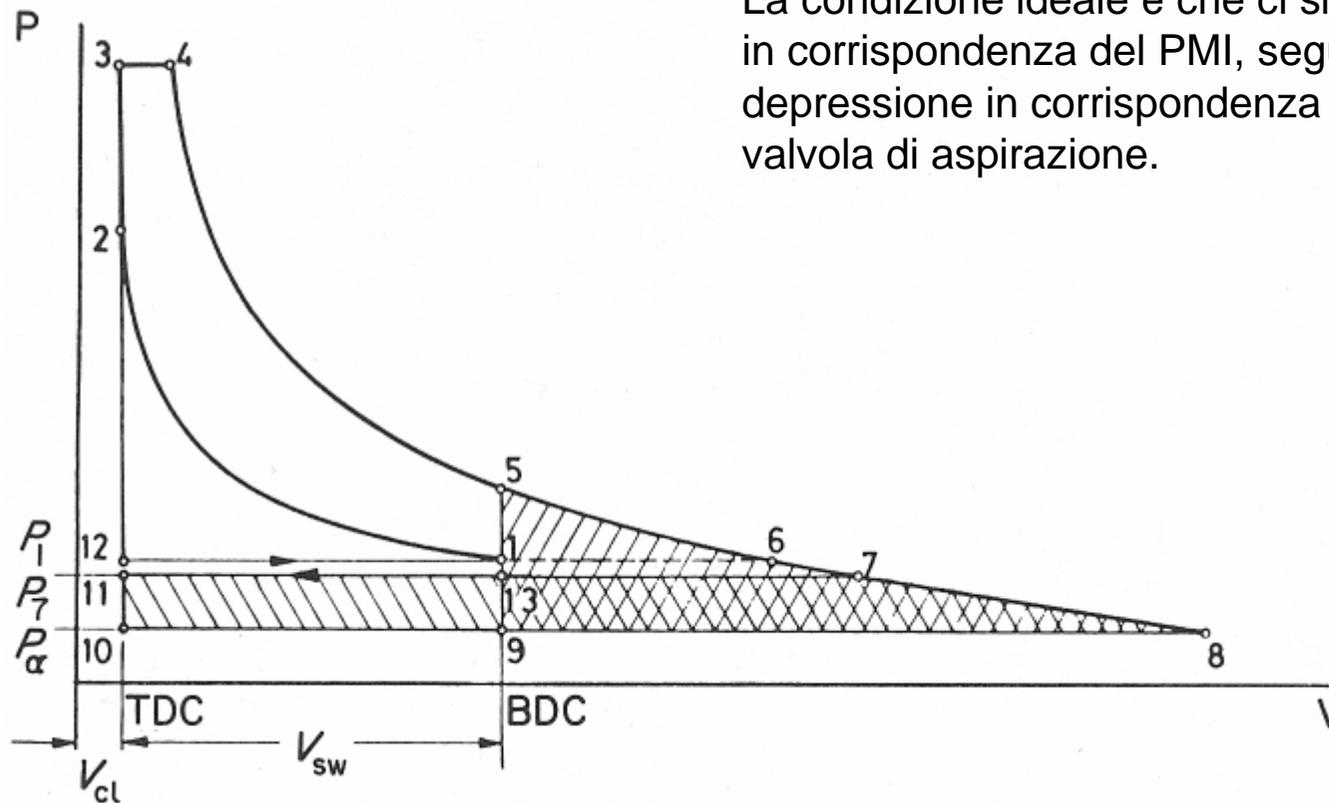


Eliminando il collettore dei gas di scarico si ottiene la sovralimentazione ad impulsi, così denominata perché la pressione nel condotto di scarico e quindi in turbina non è costante ma è determinata dalla apertura della valvola di scarico.

Motori a combustione interna

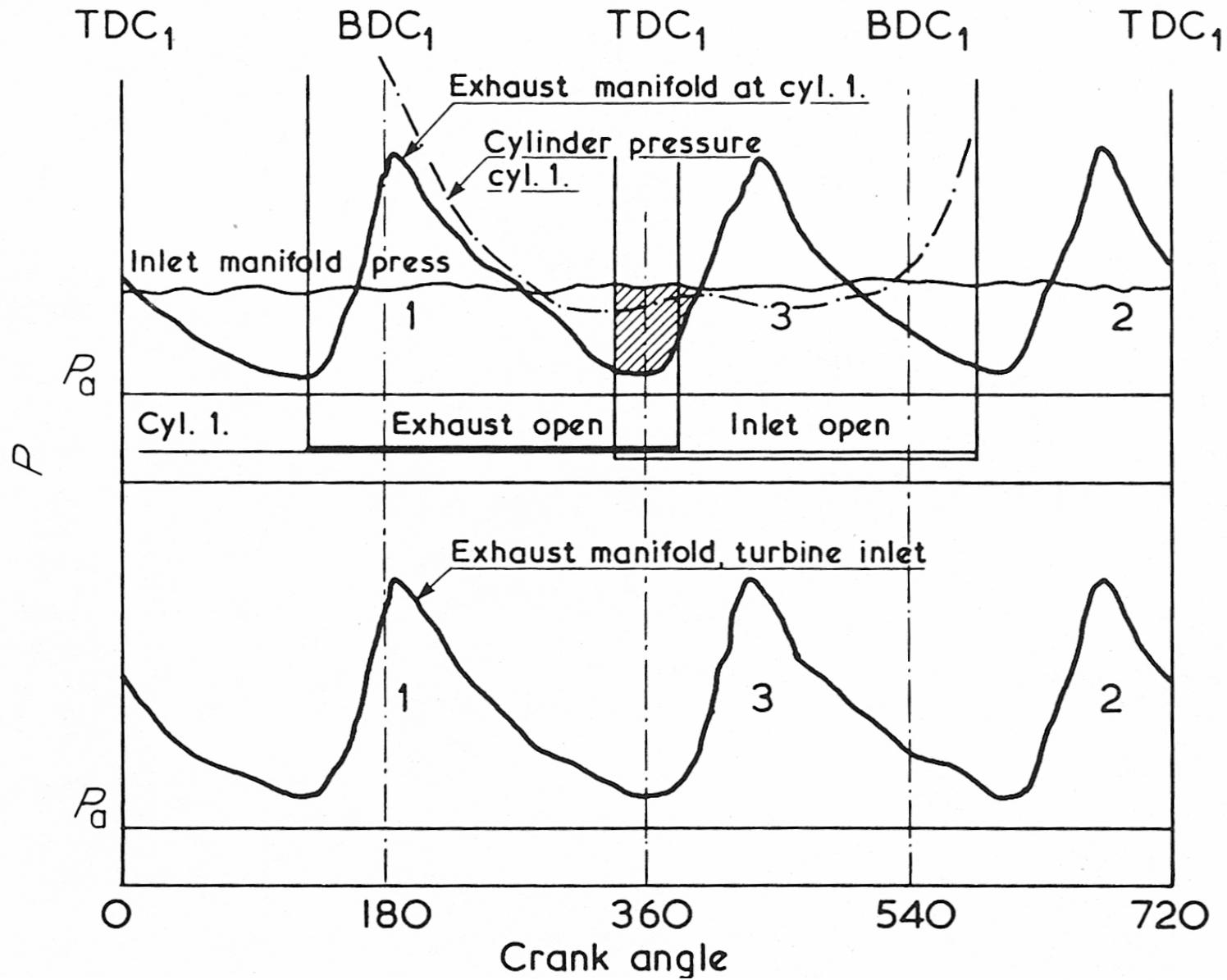
Collegando con una tubazione lo scarico della valvola direttamente alla turbina, si recupera parte dell'energia di blowdown, per cui alla turbina sarà disponibile fluido con entalpia maggiore rispetto al caso della sovralimentazione a pressione costante

Nella tubazione di collegamento la pressione passa rapidamente dal valore atmosferico al valore massimo, ovvero alla p_5 . Successivamente deve ritornare ad un valore possibilmente minore della pressione del collettore di aspirazione quando la valvola di aspirazione si apre e la valvola di scarico è ancora aperta.

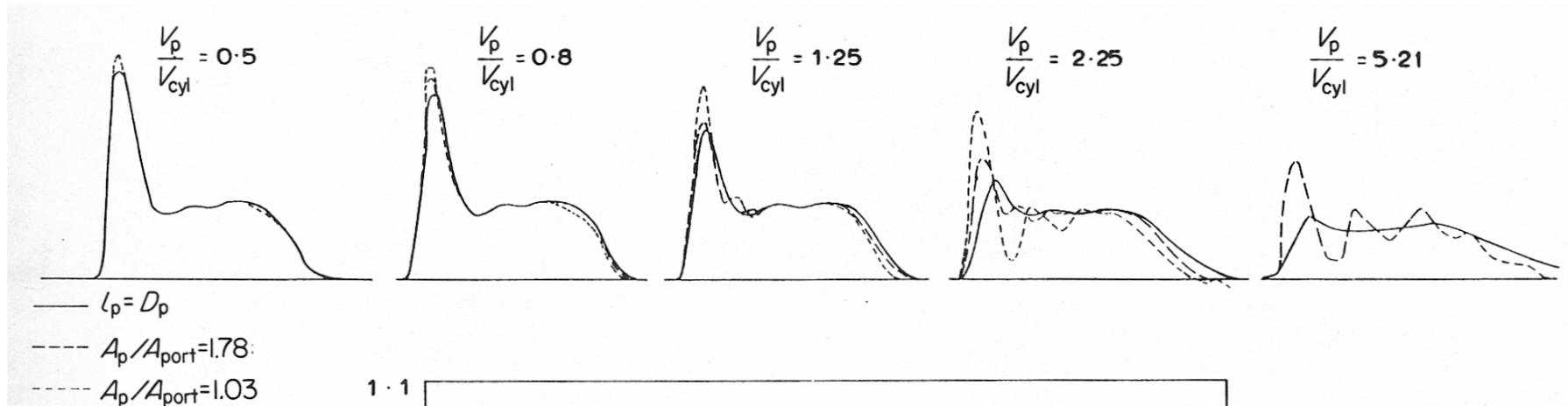


La condizione ideale è che ci sia un picco di pressione in corrispondenza del PMI, seguito da una depressione in corrispondenza dell'apertura della valvola di aspirazione.

Motori a combustione interna

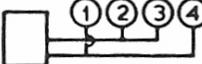
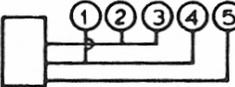
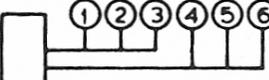
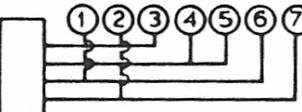
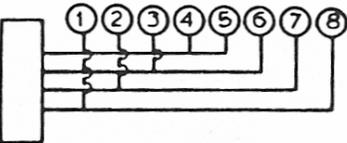
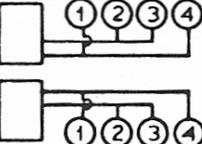
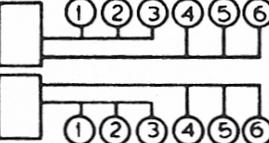
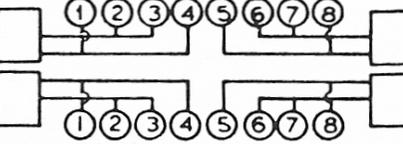


Motori a combustione interna



I grafici riportati mostrano la variazione della pressione a seguito dell'apertura della valvola di scarico in funzione del rapporto tra volume del condotto di scarico e cilindrata e per diversi valori del rapporto tra la sezione della tubazione e la sezione della valvola

Motori a combustione interna

No. of Cylinders	Firing order	
4	1-3-4-2	
5	1-2-4-5-3	
6	1-5-3-6-2-4	
7	1-3-5-7-6-5-4	
8	1-6-2-4-8-3-7-5 1-5-7-3-8-4-2-6 1-3-2-5-8-6-7-4	
8V	4 2 1 3 ∩ ∩ ∩ 1 3 4 2	
12V	6 2 4 1 5 3 ∩ ∩ ∩ ∩ 1 5 3 6 2 4	
16V	8 4 2 6 1 5 7 3 ∩ ∩ ∩ ∩ ∩ ∩ 1 5 7 3 8 4 2 6	

Motori a combustione interna

Sovralimentazione ad impulsi

Vantaggi

Maggiore energia disponibile alla turbina, viene recuperata anche parte dell'energia cinetica dei gas esausti.

Migliore rendimento a carichi parziali

Maggiore prontezza alle variazioni di carico

Svantaggi

Minore efficienza della turbina a causa del maggior numero di ingressi

Minore efficienza della turbina a causa del flusso non stazionario alle alte potenze

Maggiore complessità dei collettori di scarico, limitazioni alla posizione delle turbosoffianti

Sensibilità alle variazioni di giri a causa delle possibili interferenze negative nelle onde di pressione nei condotti.

Motori a combustione interna

Sovralimentazione pressione costante

Vantaggi

Alta efficienza della turbina alla potenza massima.

Migliore rendimento del gruppo ai carichi alti

Collettore di scarico di semplice disegno

Svantaggi

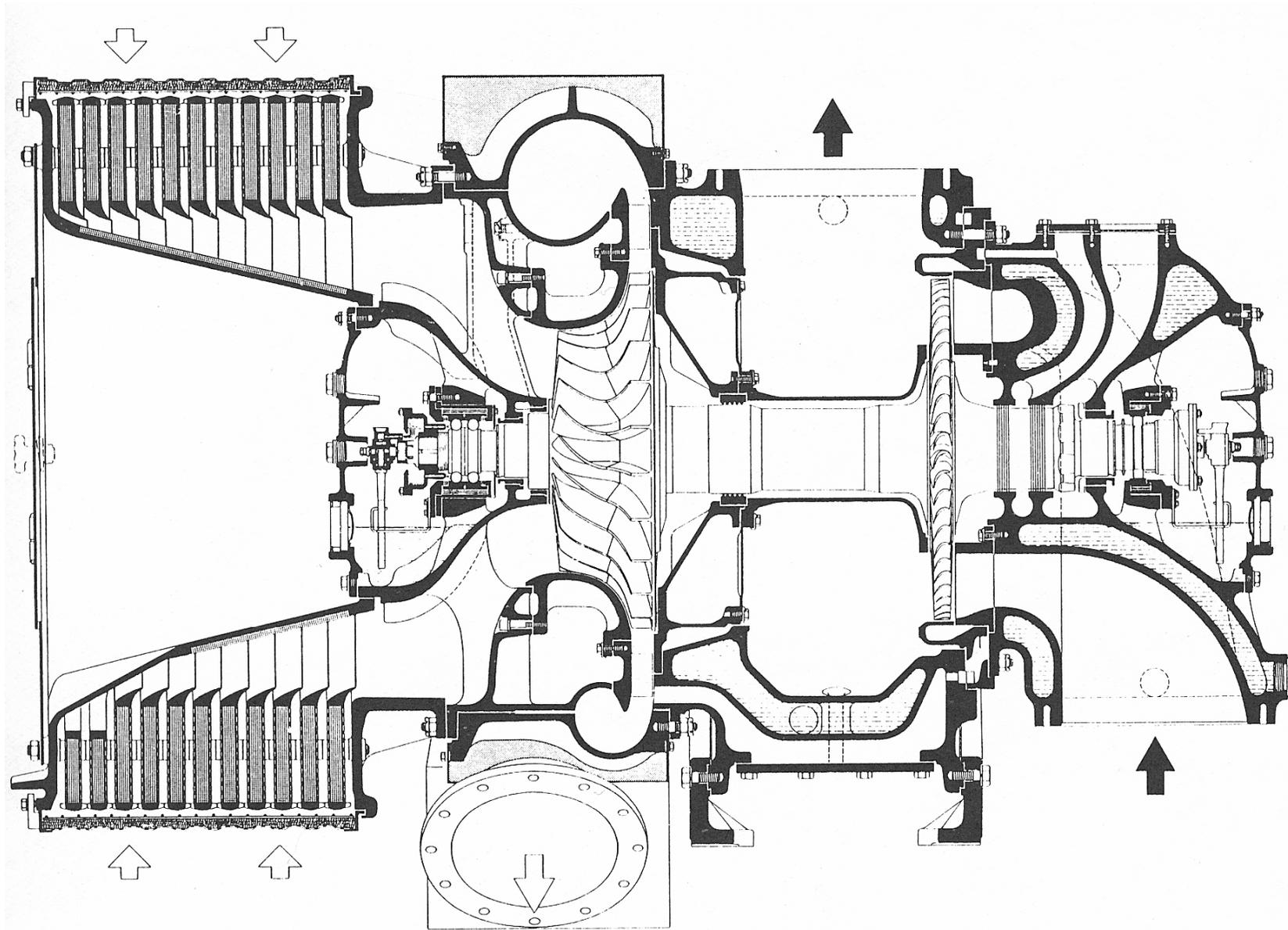
Minore lavoro disponibile alla turbina.

Bassa efficienza ai carichi parziali

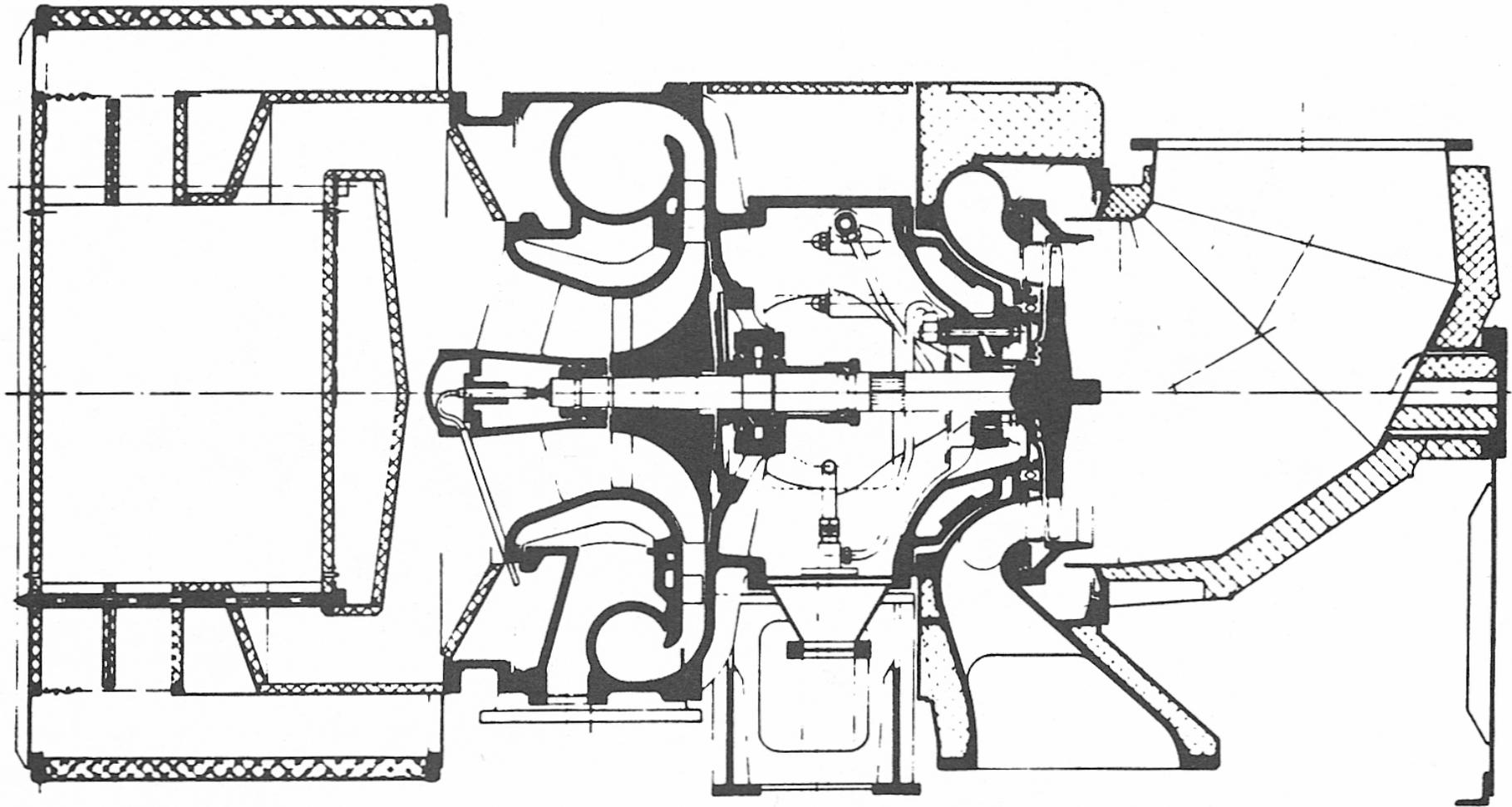
Ritardo nelle variazioni di carico rapide

Viene preferita nei motori ottimizzati per le prestazioni nominali

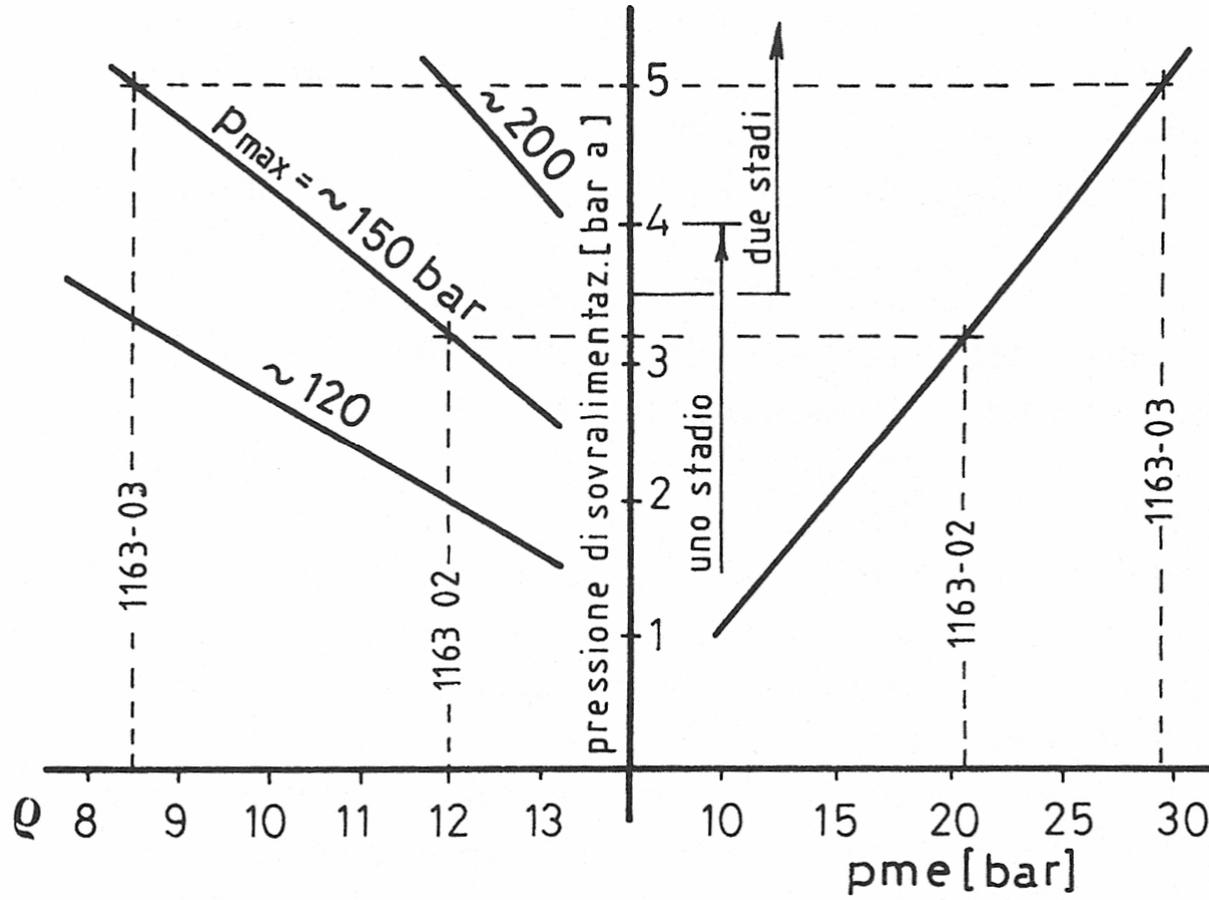
Motori a combustione interna



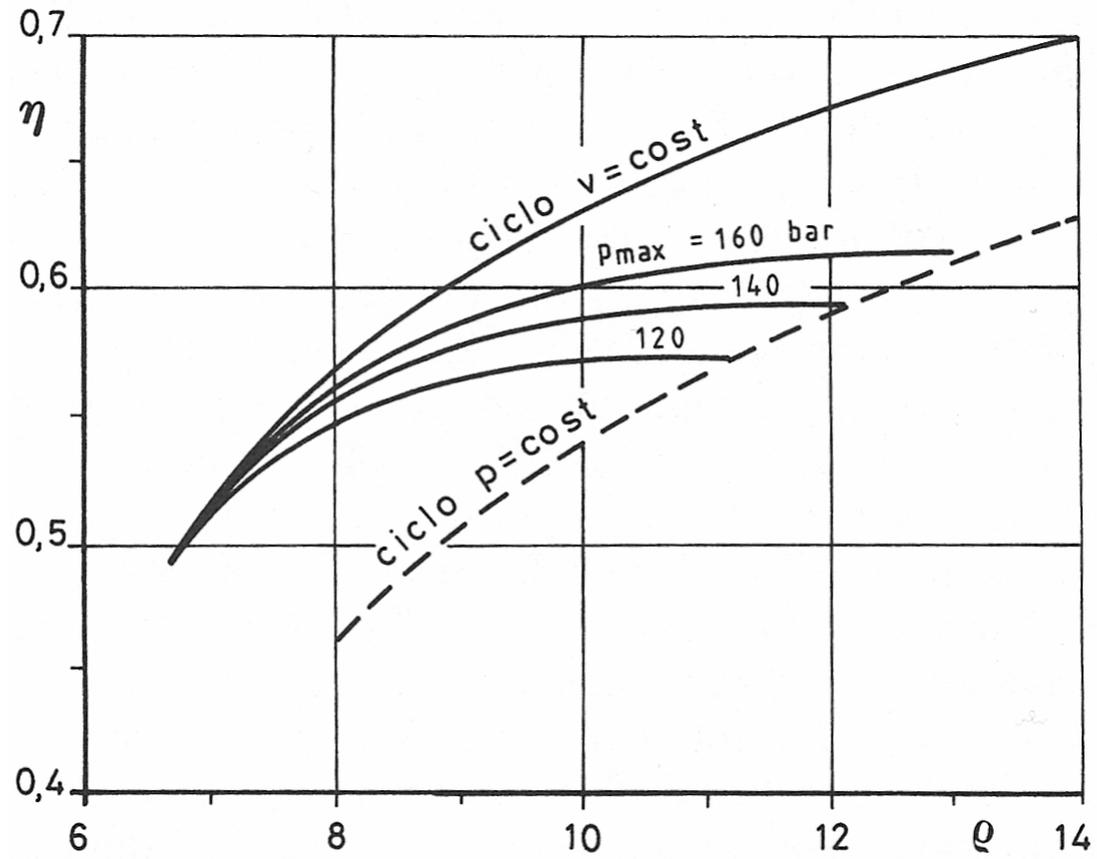
Motori a combustione interna

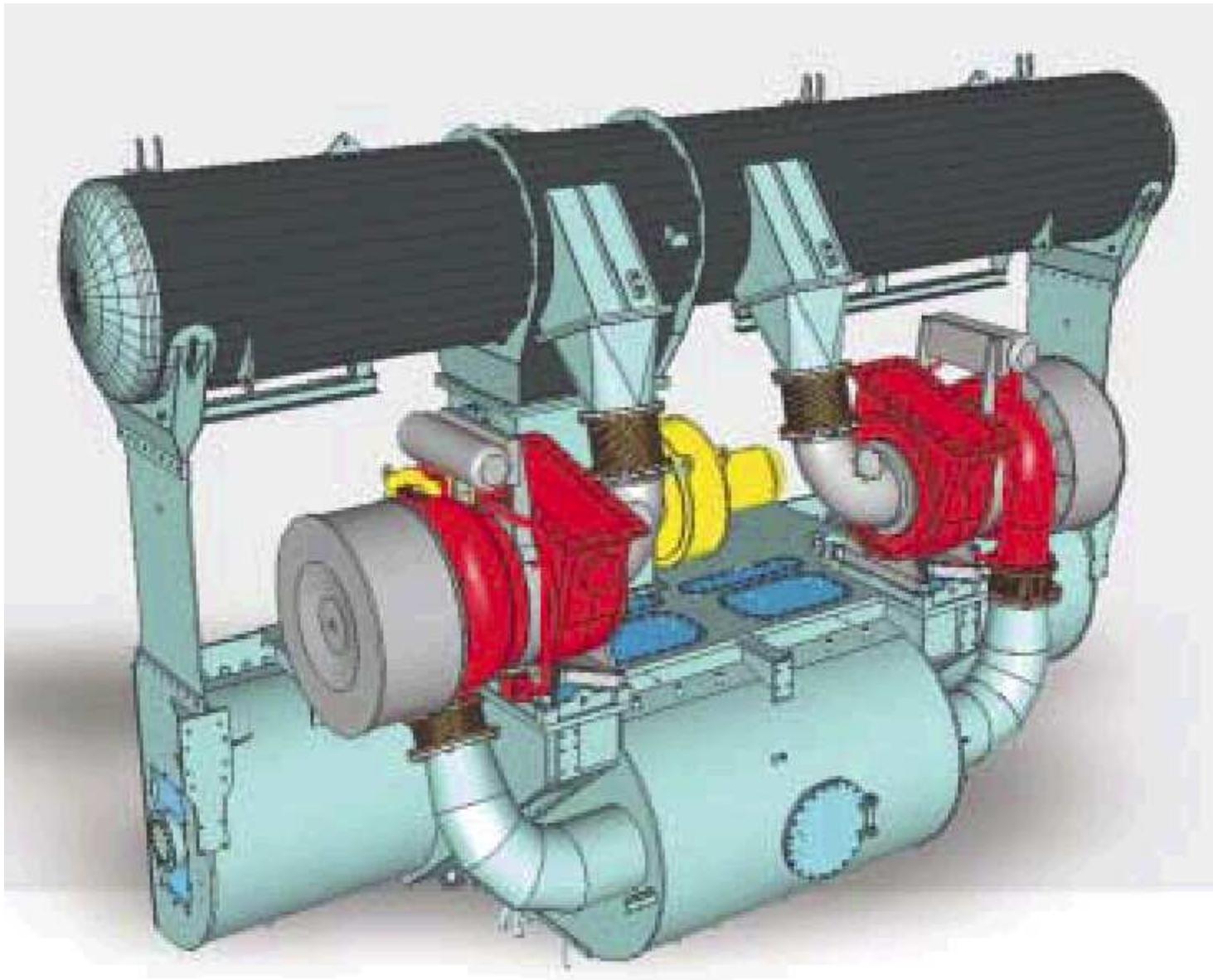


Motori a combustione interna



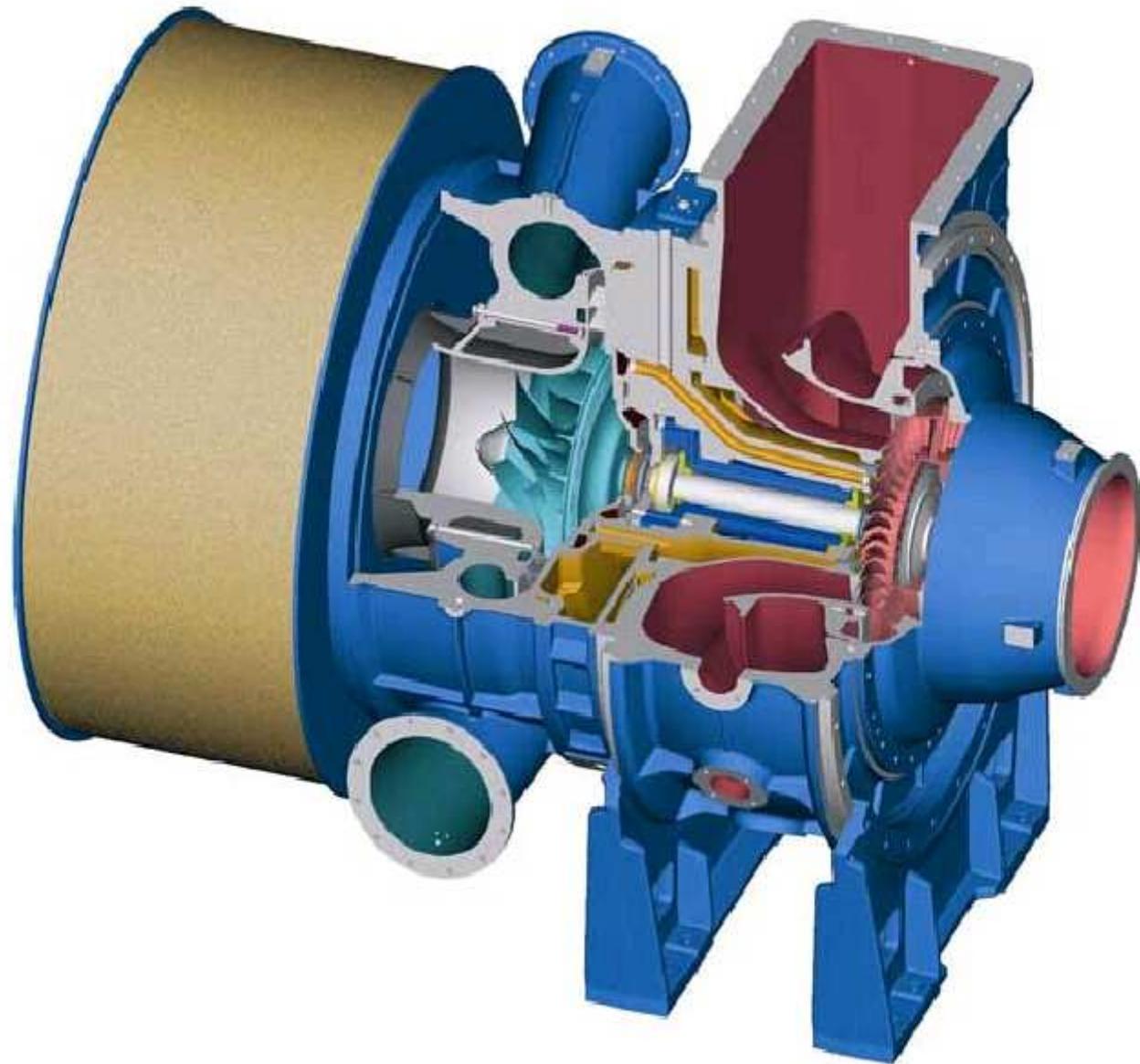
Motori a combustione interna

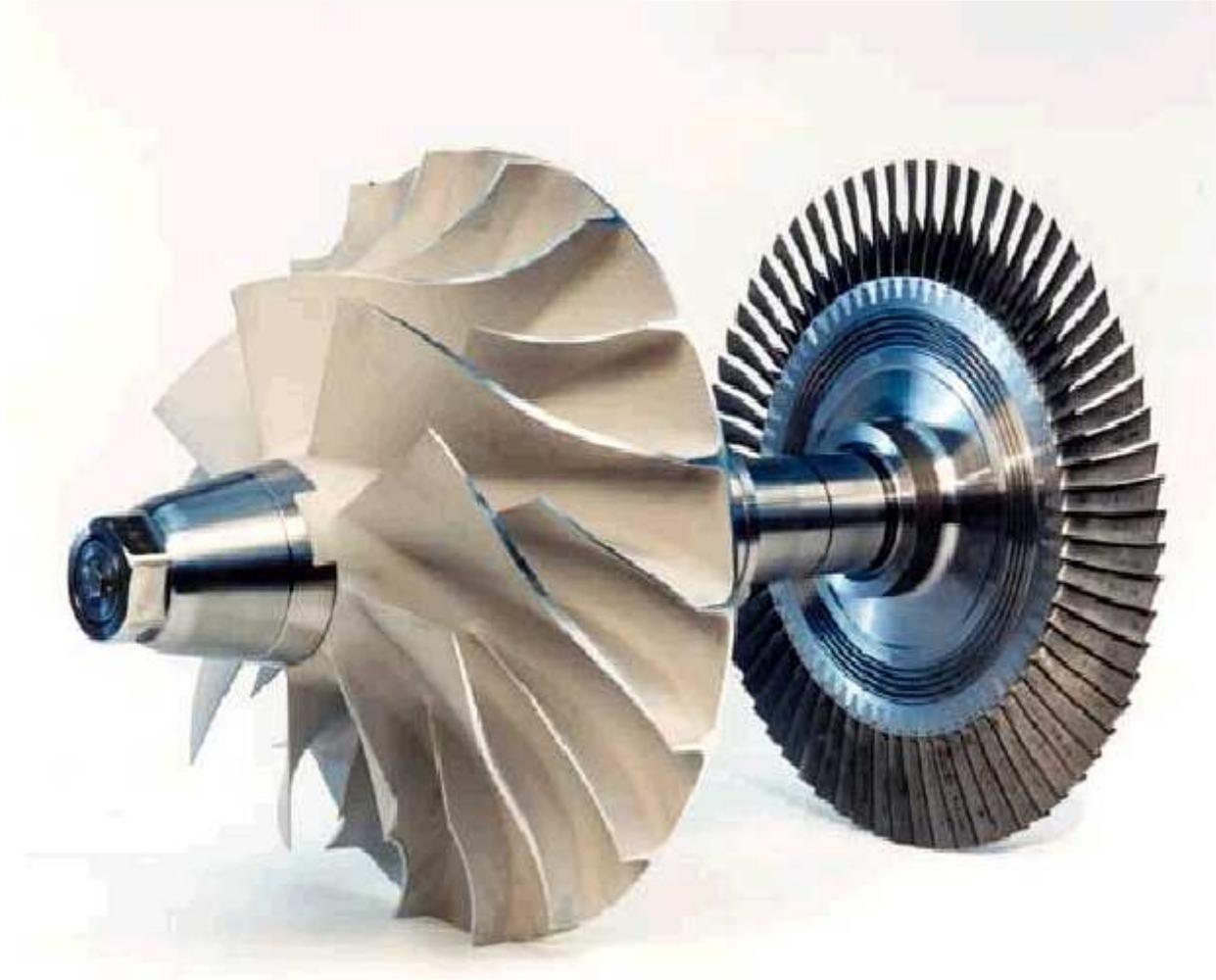








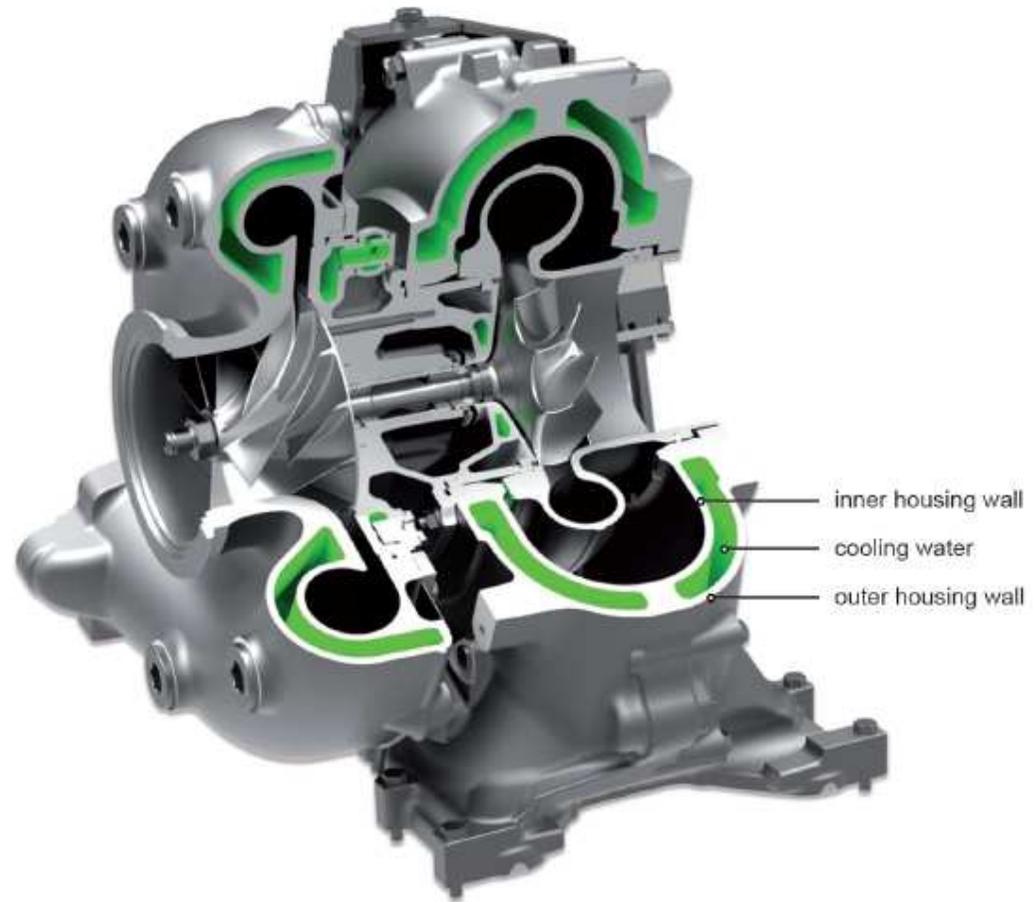




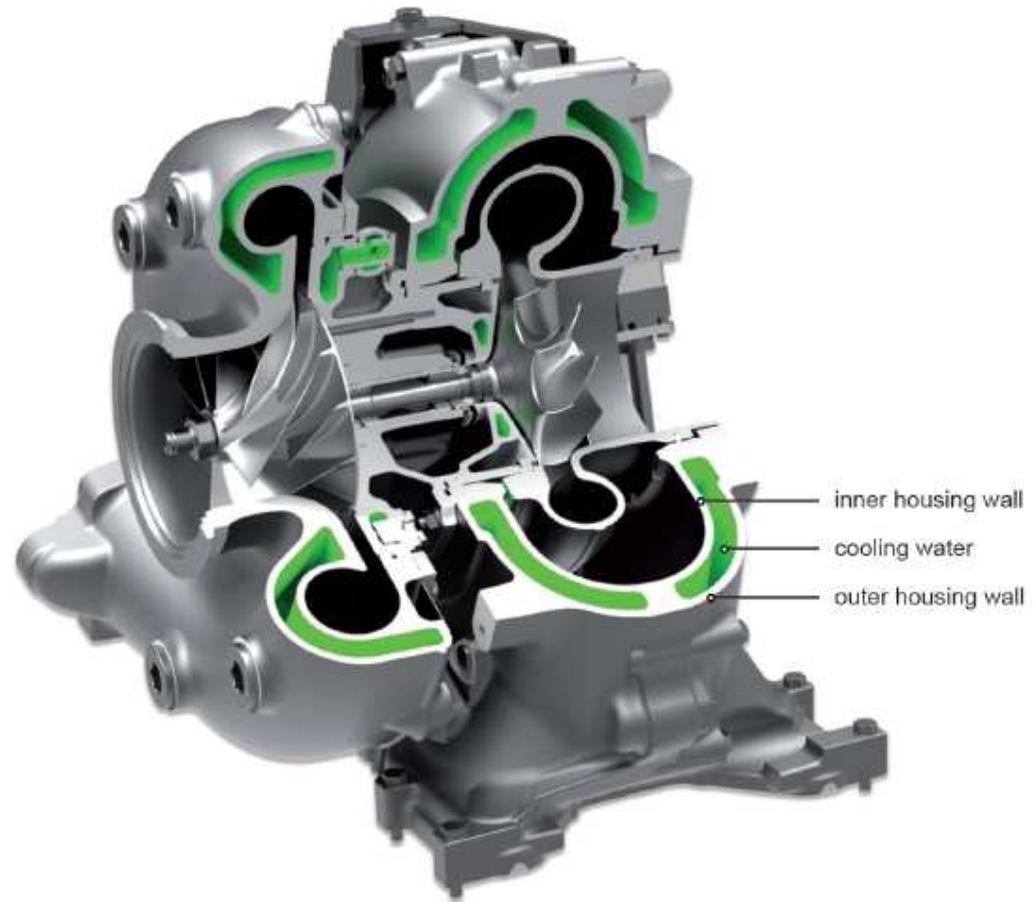
Motori a combustione interna



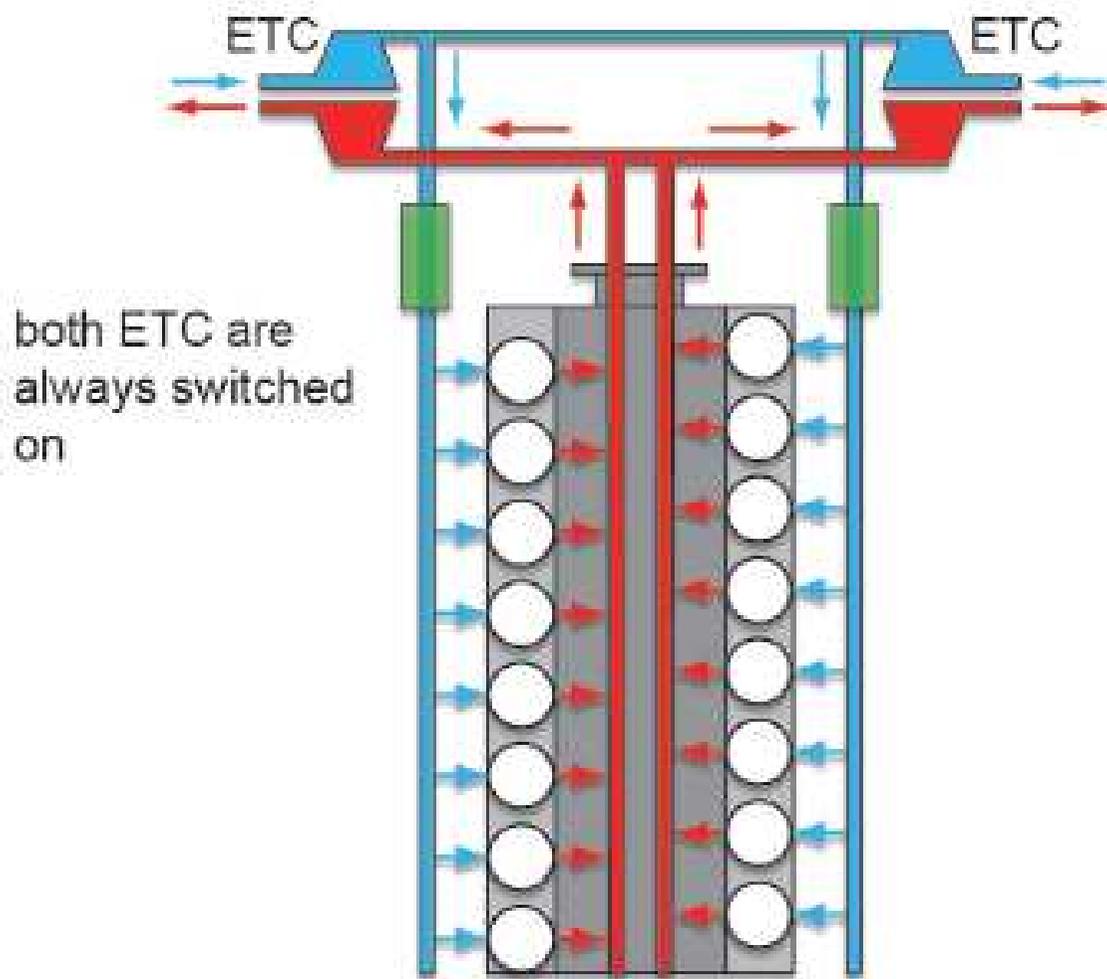
Motori a combustione interna



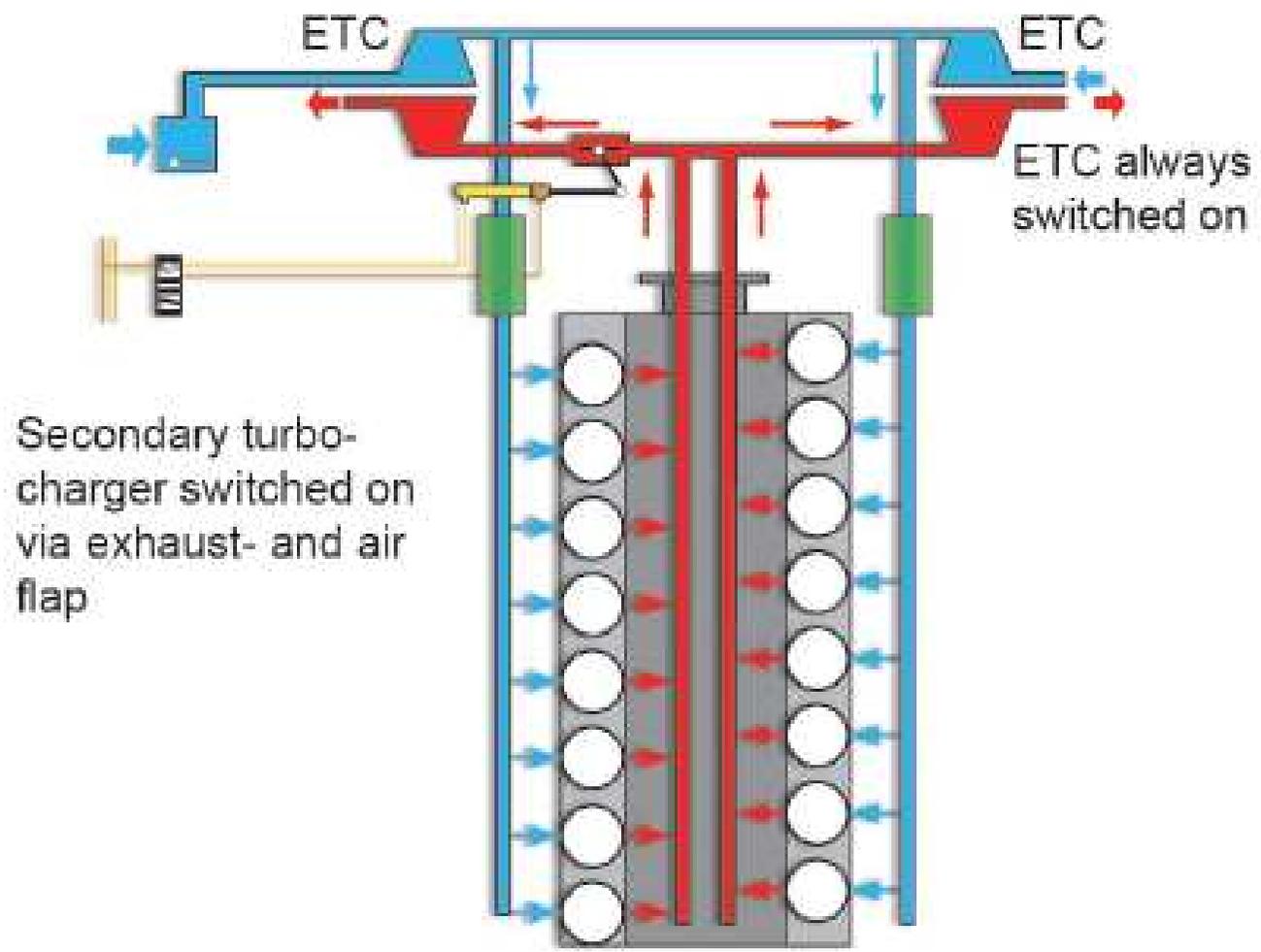
Motori a combustione interna



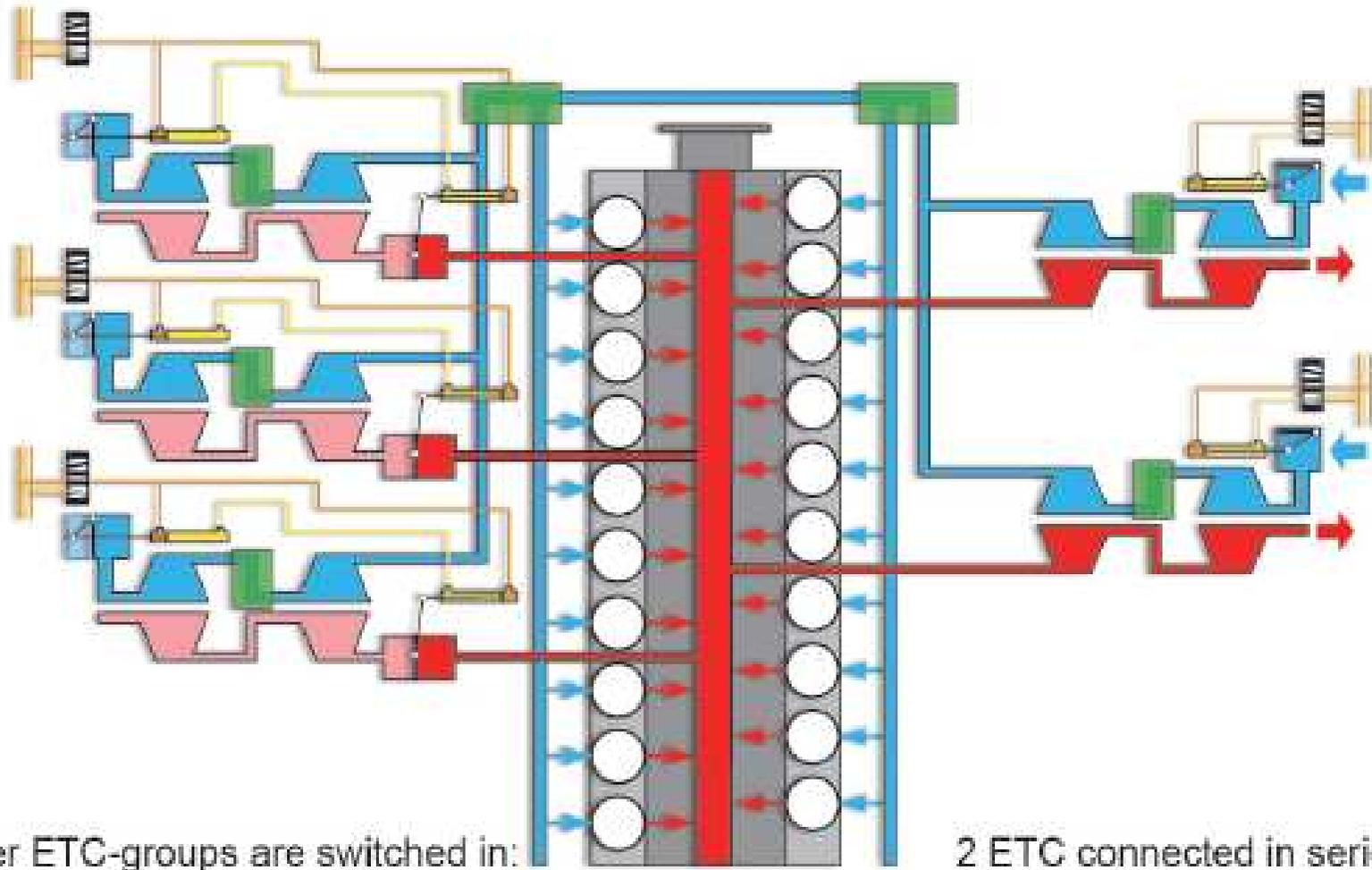
Motori a combustione interna



Motori a combustione interna



Motori a combustione interna



further ETC-groups are switched in:
"sequential turbocharging"

2 ETC connected in series:
"2-stage turbocharging"

Motori a combustione interna

