

# Dispensa del corso di “SISTEMI ENERGETICI”

Argomento: Sistemi Energetici (parte 2)

**Prof. Mauro Venturini**  
Dipartimento di Ingegneria



università di ferrara  
DA SEICENTO ANNI GUARDIAMO AVANTI.

# Motori alternativi a combustione interna

# Sommario

- Introduzione
- Parametri di funzionamento
- Diagramma di indicatore reale e ideale
- Funzionamento reale del motore
- Curve di prestazione

# Introduzione

# Motore a 2 e a 4 tempi

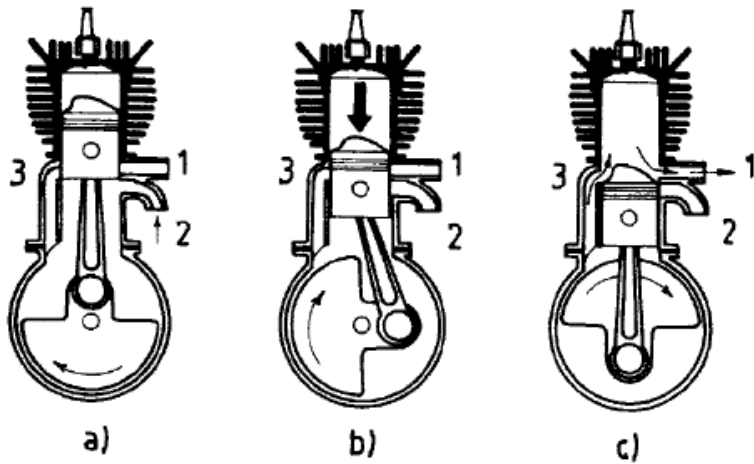


Figura 1.2: Fasi del ciclo a due tempi.

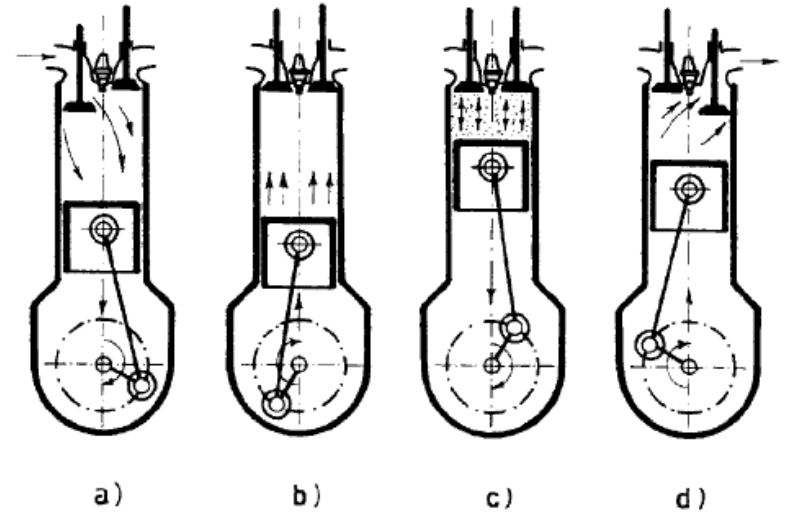


Figura 1.1: Fasi del ciclo a quattro tempi.

# Disegno costruttivo di un MCI

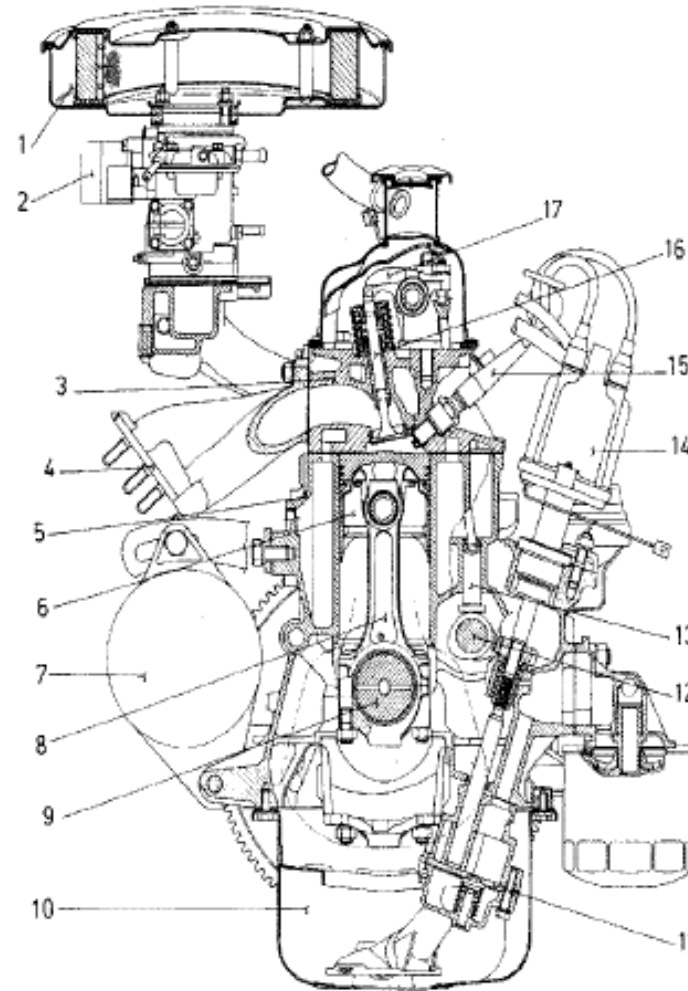


Figura 1.3: Sezione trasversale di un motore veloce. 1. Filtro aria. 2. Carburatore. 3. Testata. 4. Condotto di scarico. 5. Blocco cilindri (monoblocco). 6. Pistone. 7. Alternatore. 8. Biella. 9. Albero motore. 10. Coppa olio. 11. Pompa olio. 12. Albero a camme. 13. Asta bilancieri. 14. Spinterogeno. 15. Candela. 16. Valvola di scarico. 17. Bilanciere.

# Disegno costruttivo di un MCI

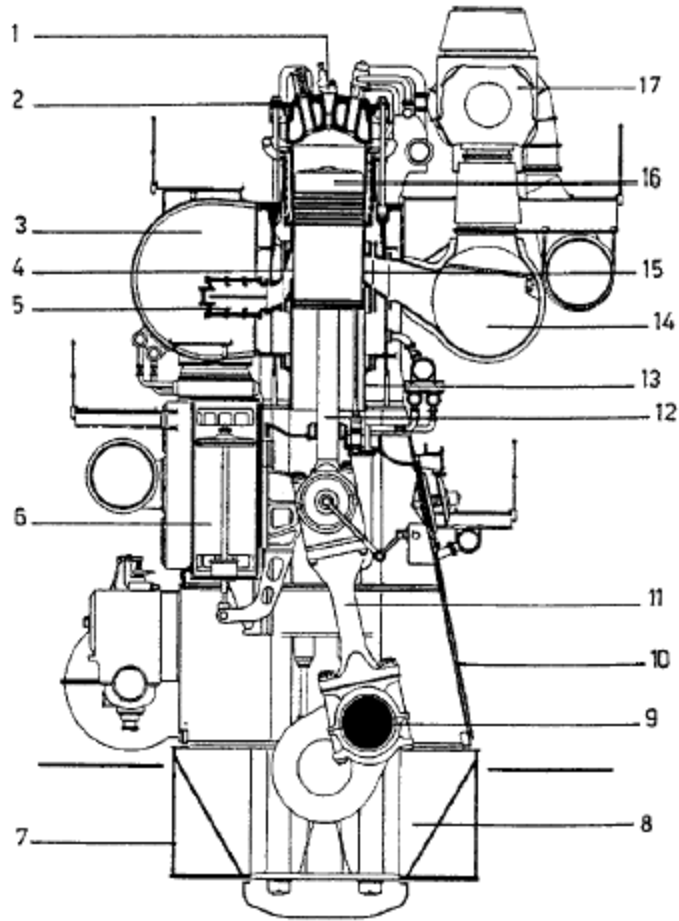


Figura 1.4: Sezione trasversale di un motore lento. 1. Iniettore. 2. Testata. 3. Collettore di lavaggio. 4. Luci di lavaggio. 5. Valvole lamellari di non ritorno. 6. Compressore alternativo aria lavaggio. 7. Basamento. 8. Carter. 9. Albero. 10. Incastallatura. 11. Biella. 12. Asta dello stantuffo. 13. Cilindro. 14. Collettore di scarico. 15. Luci di scarico. 16. Stantuffo. 17. Turbocompressore.

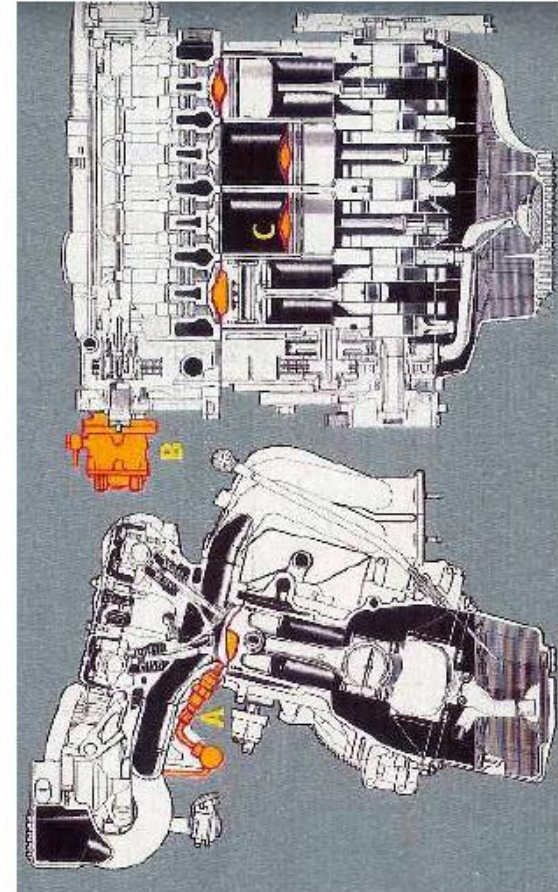


Figura 1.5: Sezione trasversale di un motore ad accensione comandata (Alfa Romeo).

# Spaccato di un MCI ad accensione spontanea (BMW)





# Disegno costruttivo di un MCI

## Architettura di un motore alternativo a 4 tempi

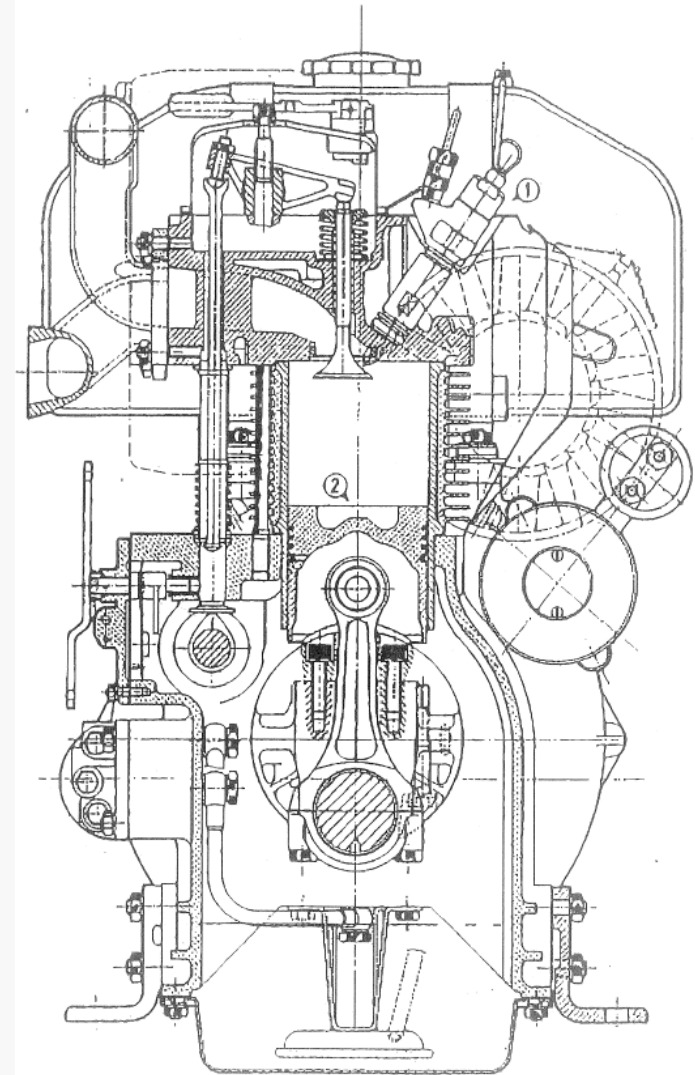
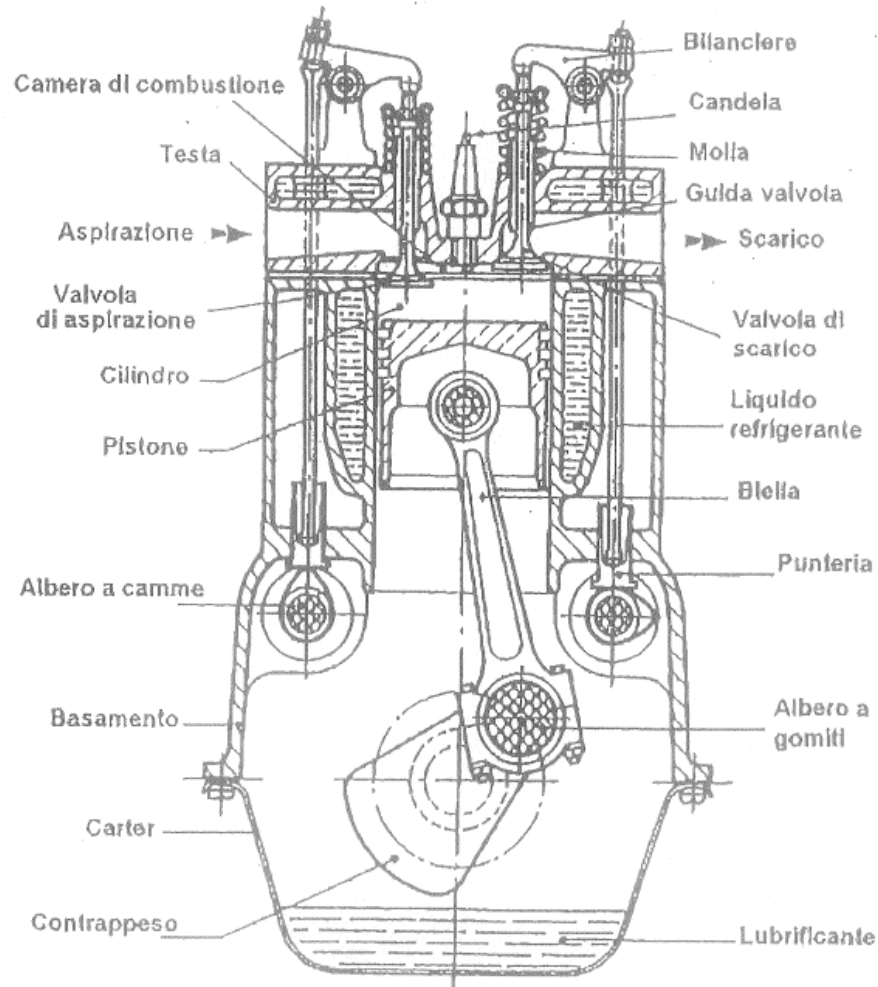


Fig. 1.3 Motore Diesel ad iniezione diretta (VM 1054-SU).

- 1 - Iniettore
- 2 - Camera di combustione

# Parametri di funzionamento

# Diagramma di indicatore reale

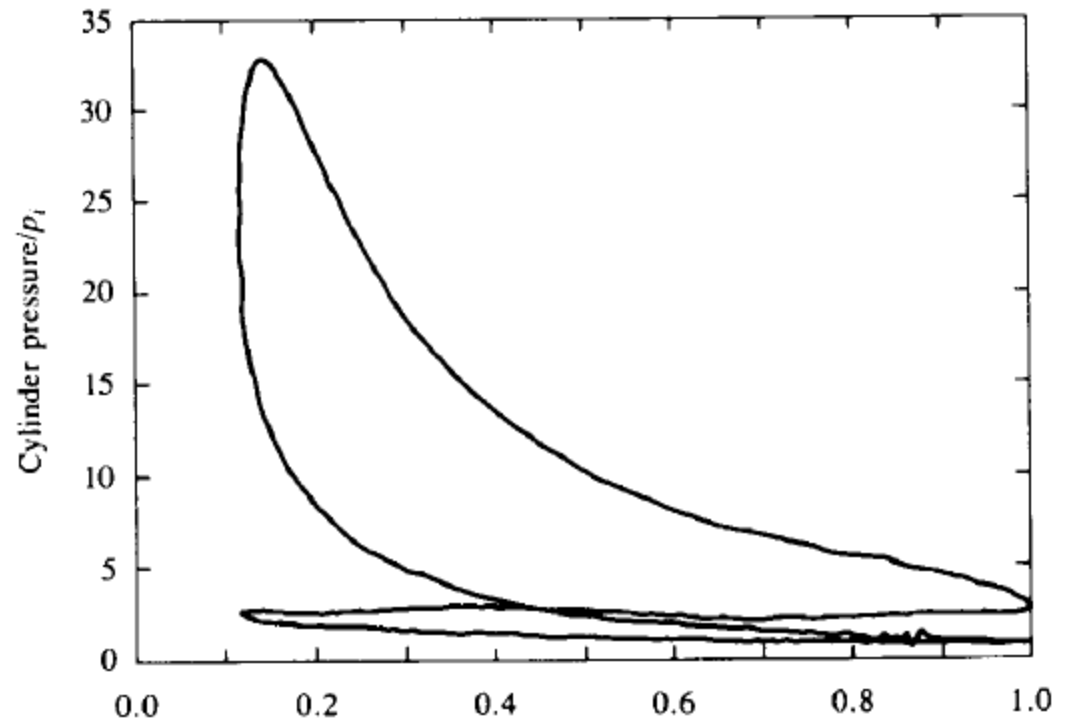
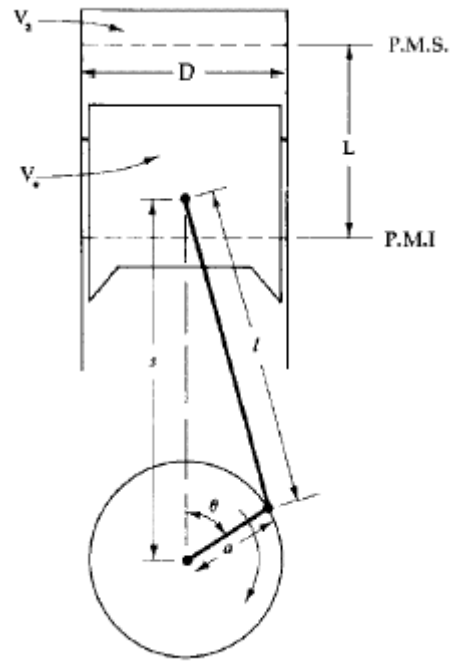


Figura 2.2: Ciclo di lavoro di un motore AC, 4T, aspirato.

# Diagrammi di indicatore ideali

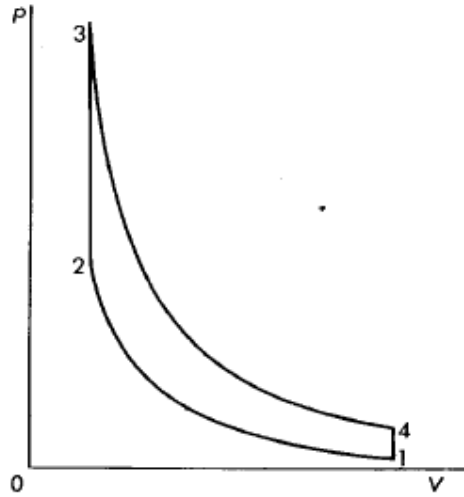


Figura 3.5: Ciclo Otto.

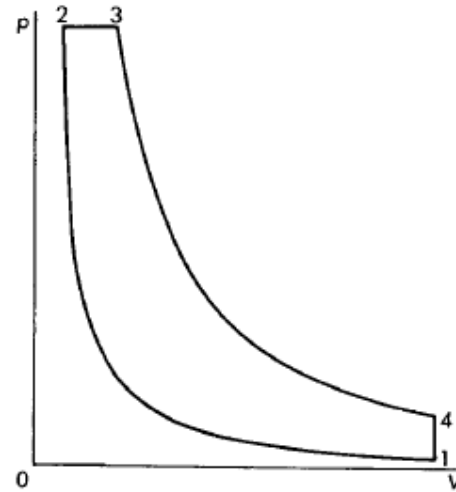


Figura 3.6: Ciclo Diesel.

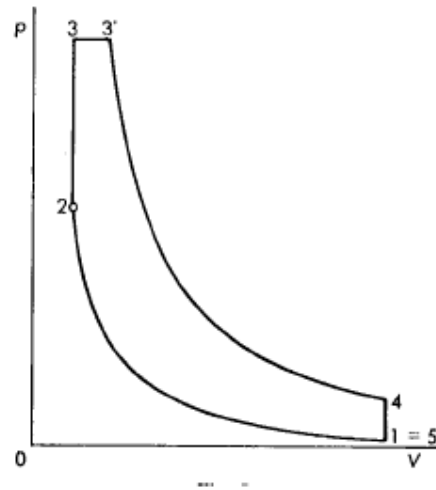


Figura 3.7: Ciclo Sabathé.

# Rendimento termodinamico

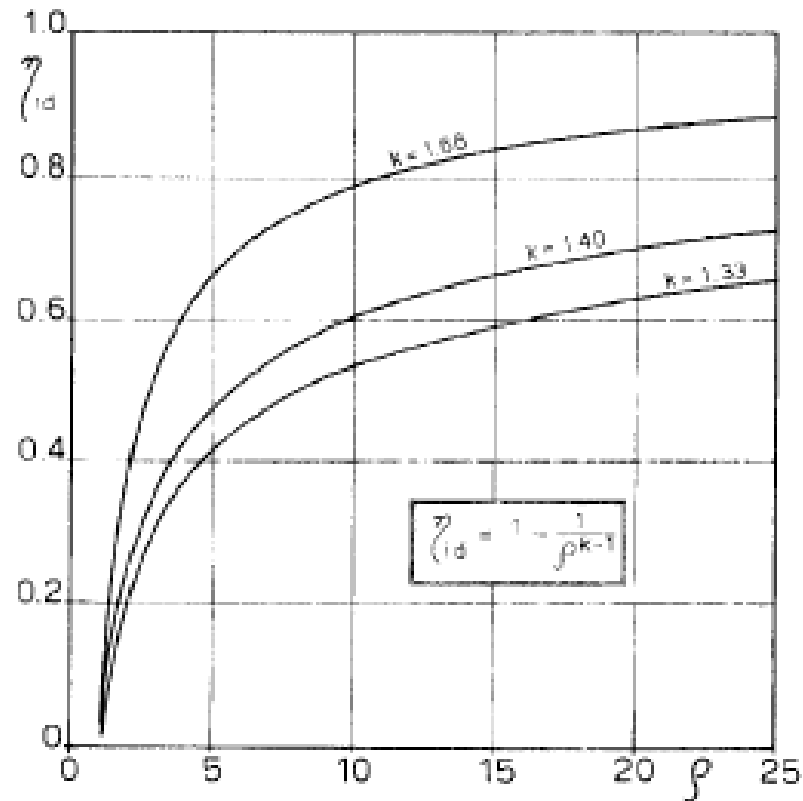


Figura 3.8: Rendimento del ciclo Otto.

# Funzionamento reale del motore

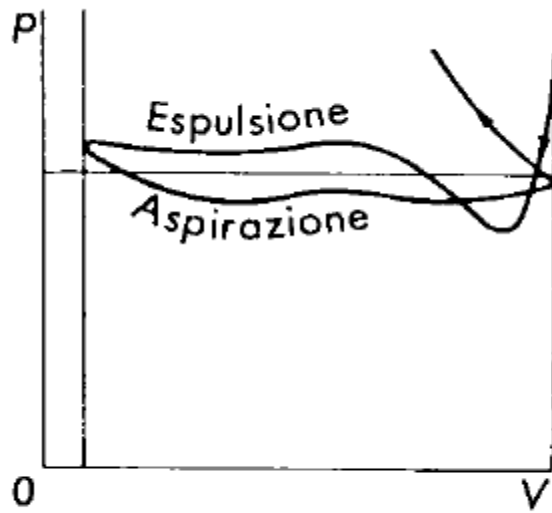


Figura 5.2: Ciclo di pompaggio per un motore 4T.

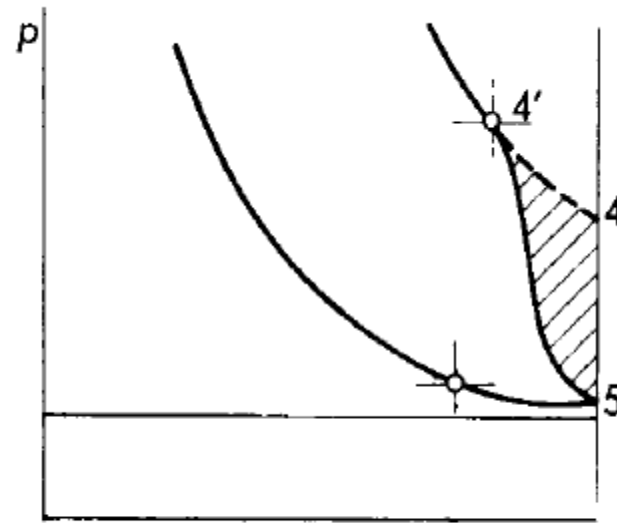


Figura 5.3: Fase di scarico e lavaggio nel ciclo indicato di un motore 2T.

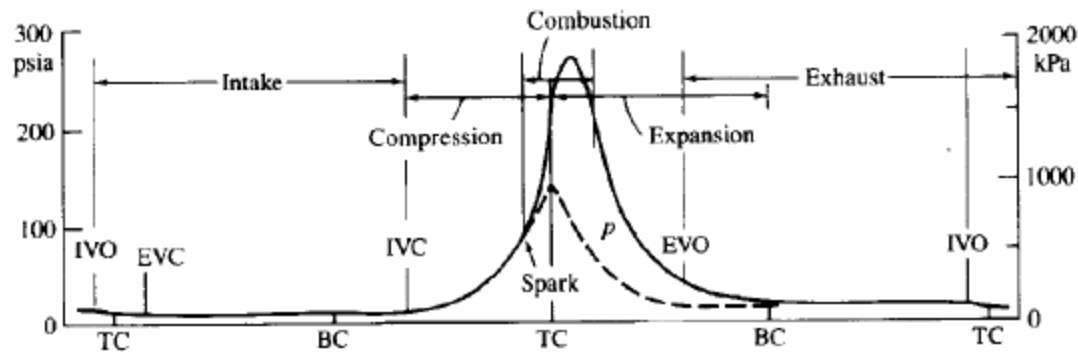


Figura 5.5: Distribuzione della pressione per un motore AC 4T: Top-Center (TC) = P.M.S; Bottom-Center (BC) = P.M.I.; Inlet Valve Opening (IVO) = apertura valvola di aspirazione; Inlet Valve Closing (IVC) = chiusura valvola di aspirazione; Exhaust Valve Opening (EVO) = apertura valvola di scarico; Exhaust Valve Closing (EVC) = chiusura valvola di scarico.



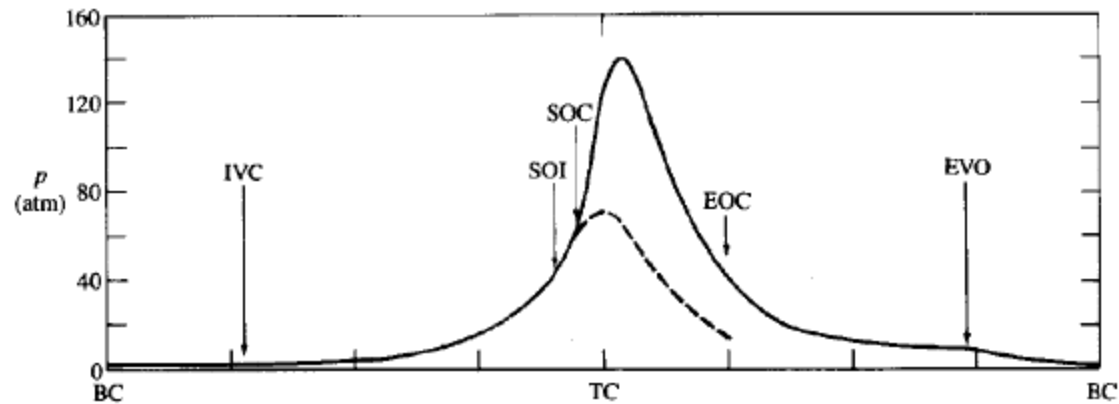


Figura 5.6: Distribuzione della pressione per un motore AS: Top-Center (TC) = P.M.S; Bottom-Center (BC) = P.M.I.; Inlet Valve Closing (IVC) = chiusura valvola di aspirazione; Exhaust Valve Opening (EVO) = apertura valvola di scarico; SOI = inizio iniezione; SOC = inizio combustione; EOC = fine combustione;

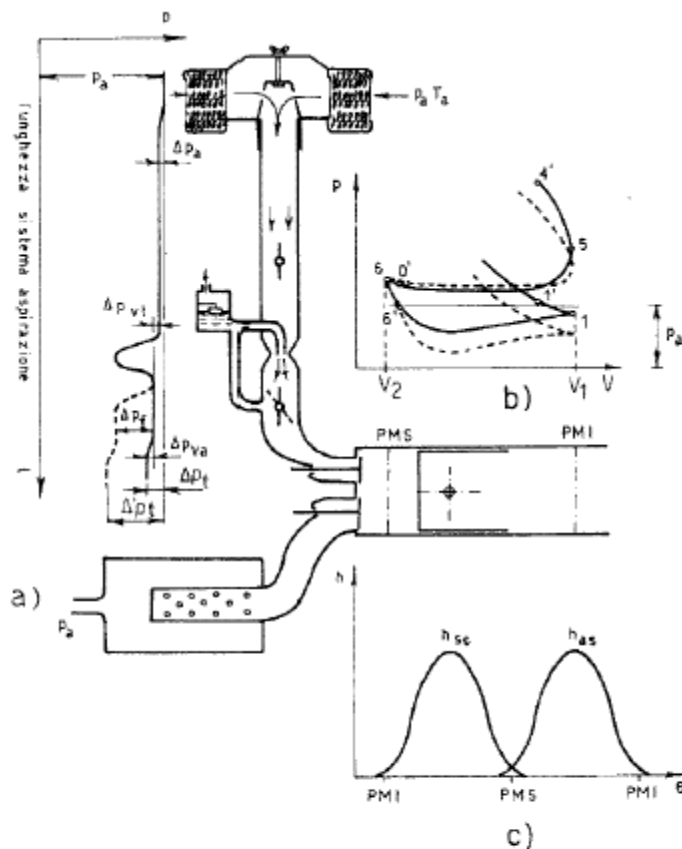


Figura 5.7: Processi di scambio di massa per un motore AC 4T: a) distribuzione della pressione lungo il sistema di aspirazione.  $\Delta p_a$  = perdite di carico nel filtro dell'aria;  $\Delta p_{vt}$  = perdite di carico nel venturi;  $\Delta p_f$  = eventuali perdite di carico dovute alla valvola a farfalla parzialmente chiusa;  $\Delta p_{v'a}$  = perdite di carico attraverso la valvola di aspirazione;  $\Delta p_t$  = perdite di carico compressive con farfalla completamente aperta;  $\Delta p'_t$  = perdite di carico compressive con farfalla parzialmente chiusa. b) Ciclo di pompaggio. La linea tratteggiata si riferisce al caso in cui la valvola a farfalla è parzialmente chiusa. c) Diagramma dell'alzata della valvola di aspirazione  $h_{as}$  e di scarico  $h_{sc}$  in funzione dell'angolo di manovella.

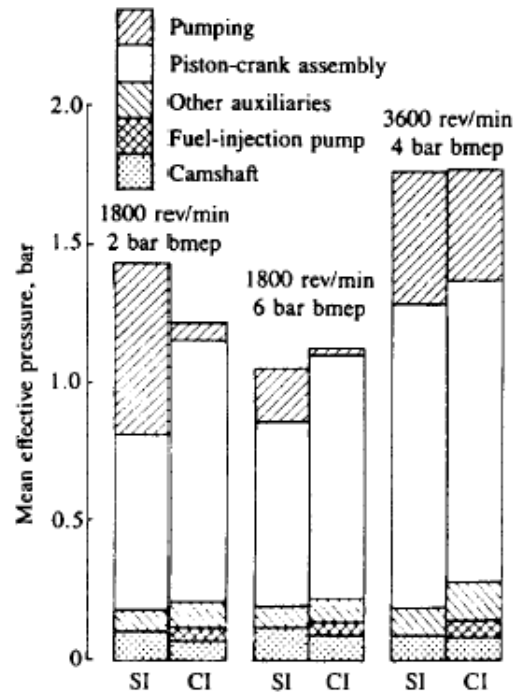


Figura 2.4: Perdite meccaniche e di pompaggio.

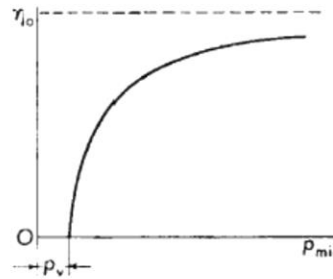


Figura 2.8: Rendimento organico in funzione del carico.

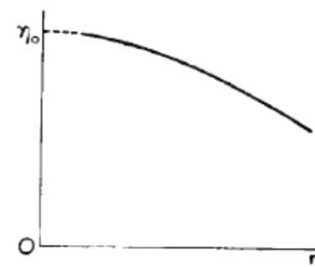


Figura 2.9: Rendimento organico in funzione della velocità di rotazione.

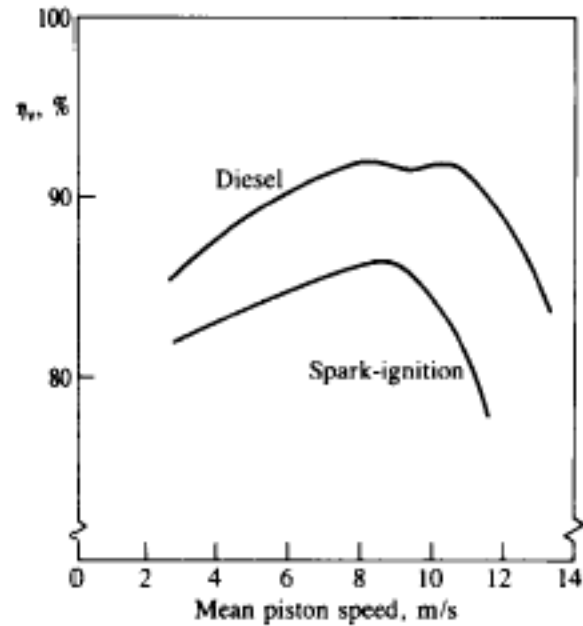


Figura 5.14: Coefficiente di riempimento in funzione della velocità media del pistone: confronto tra motore AC (*Spark-ignition*) e motore AS (*Diesel*).

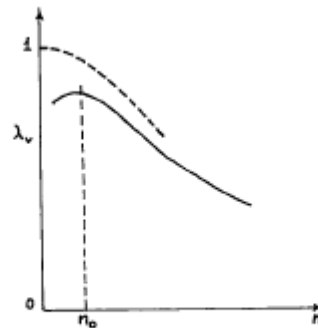


Figura 5.11: Coefficiente di riempimento in funzione della velocità di rotazione.

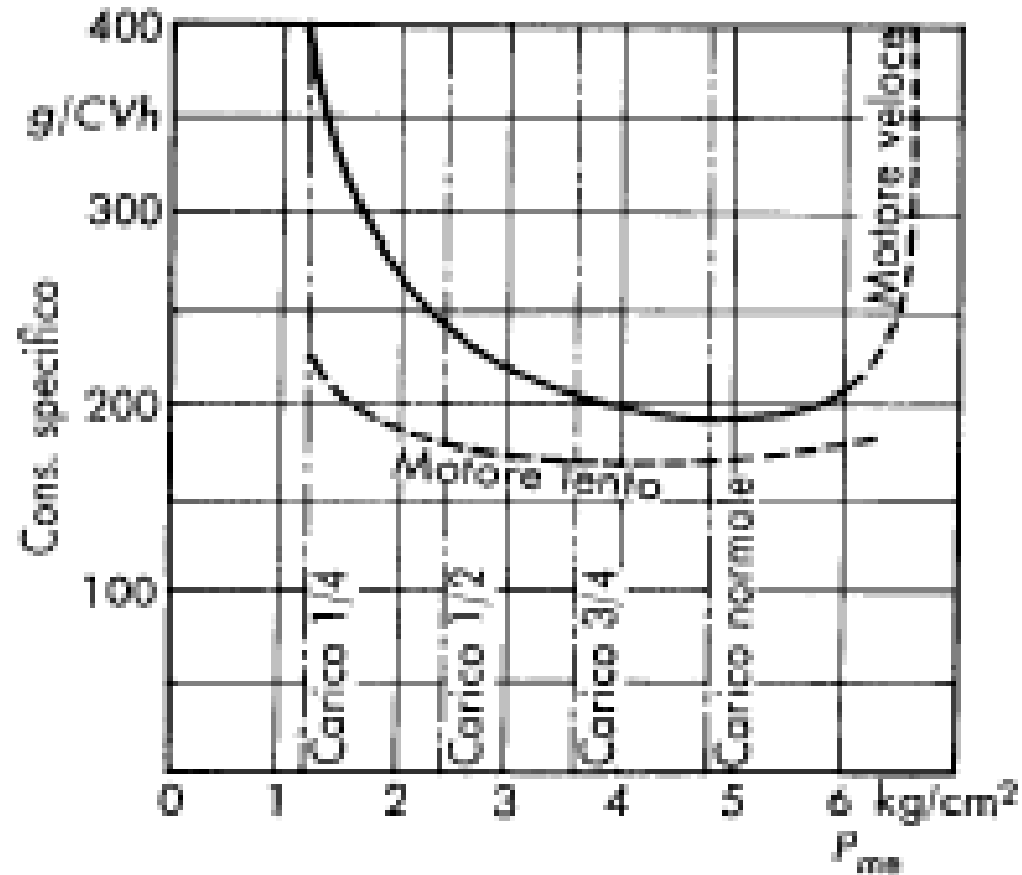
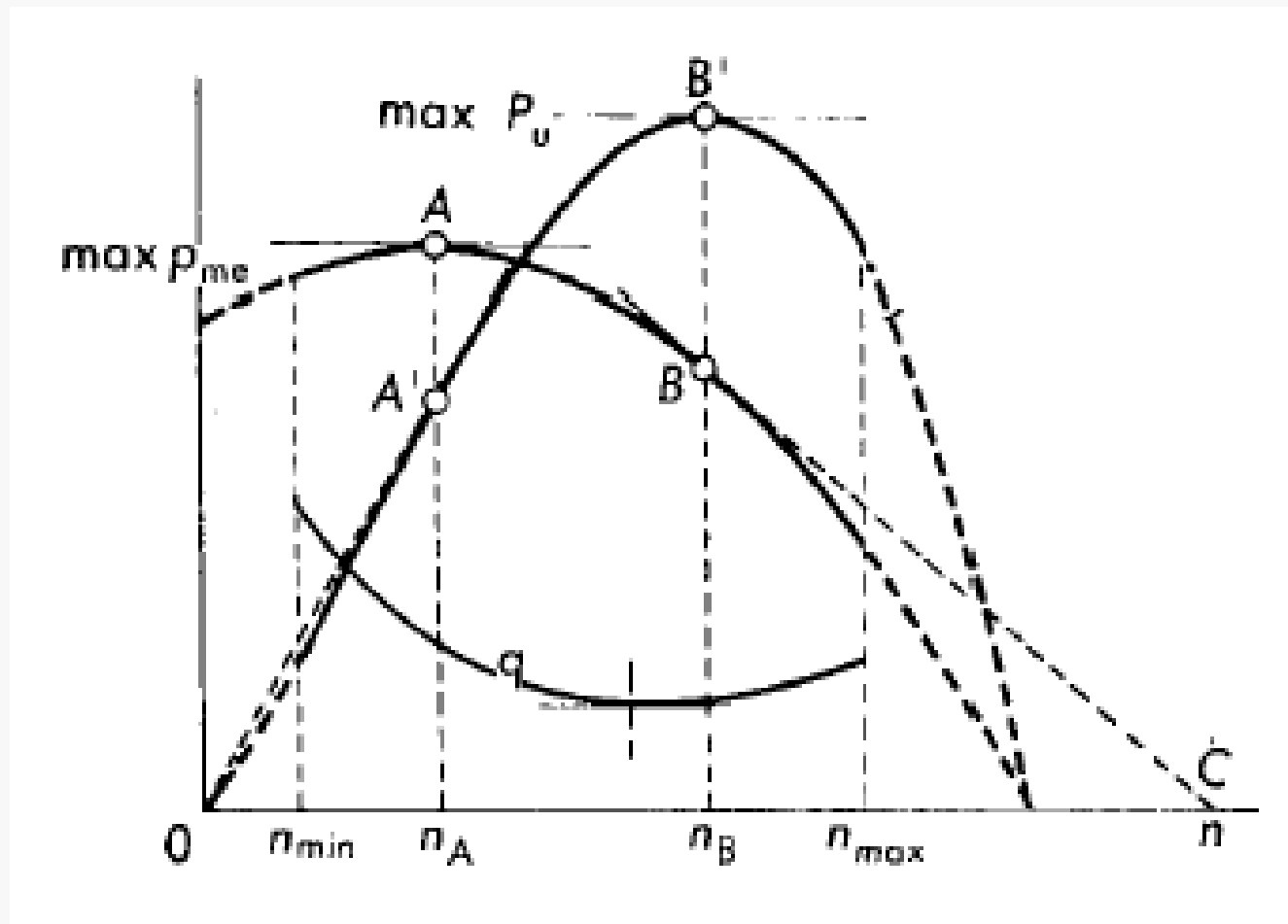


Figura 5.19: Influenza della variazione di carico in un motore AS.

# Curve di prestazione

# Curve di prestazione di un MCI



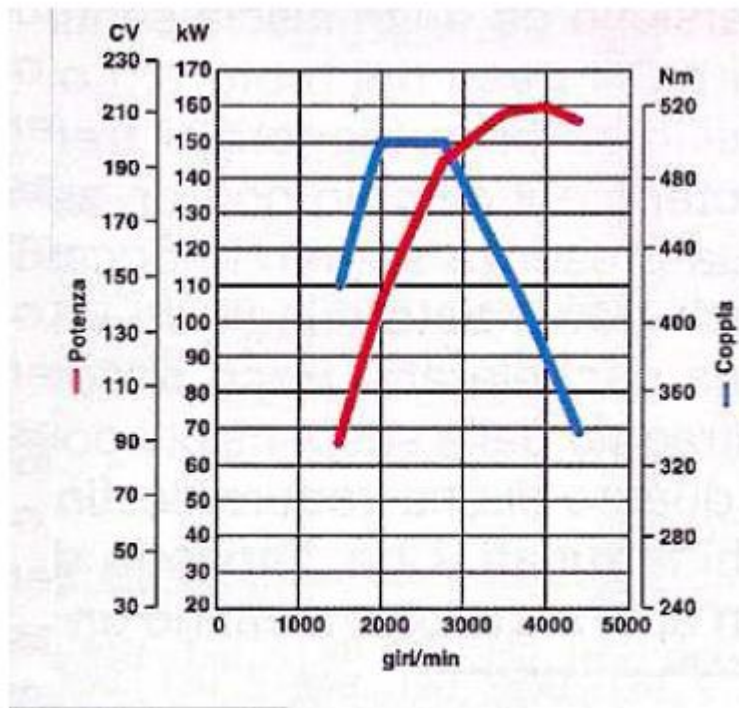


Figura 6.24: Curve caratteristiche di un motore AS (BMW).

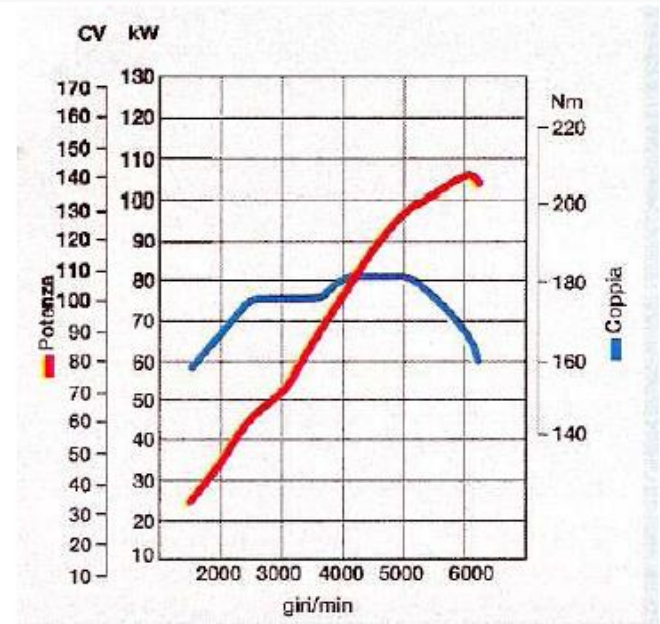


Figura 6.23: Curve caratteristiche di un motore AC (Mazda).



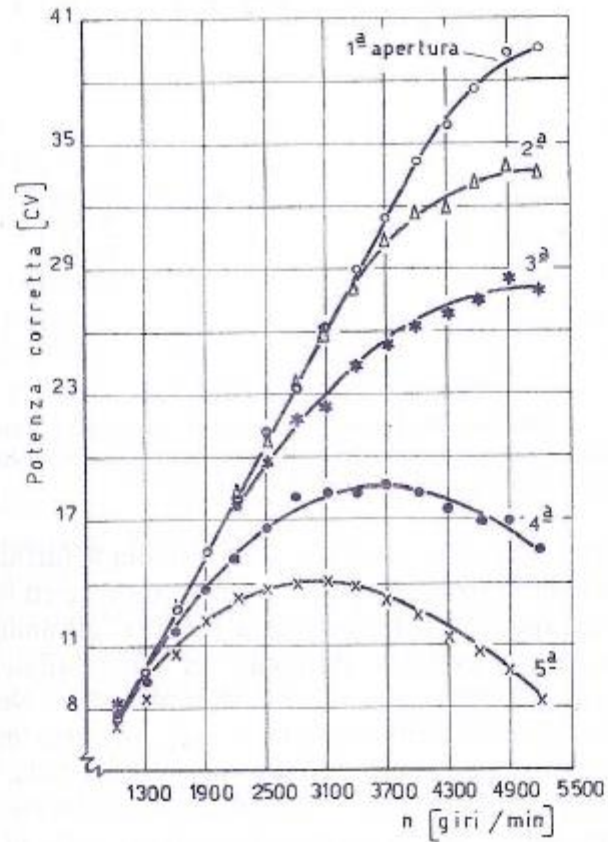


Figura 6.25: Curve di potenza al variare della posizione della valvola a farfalla.

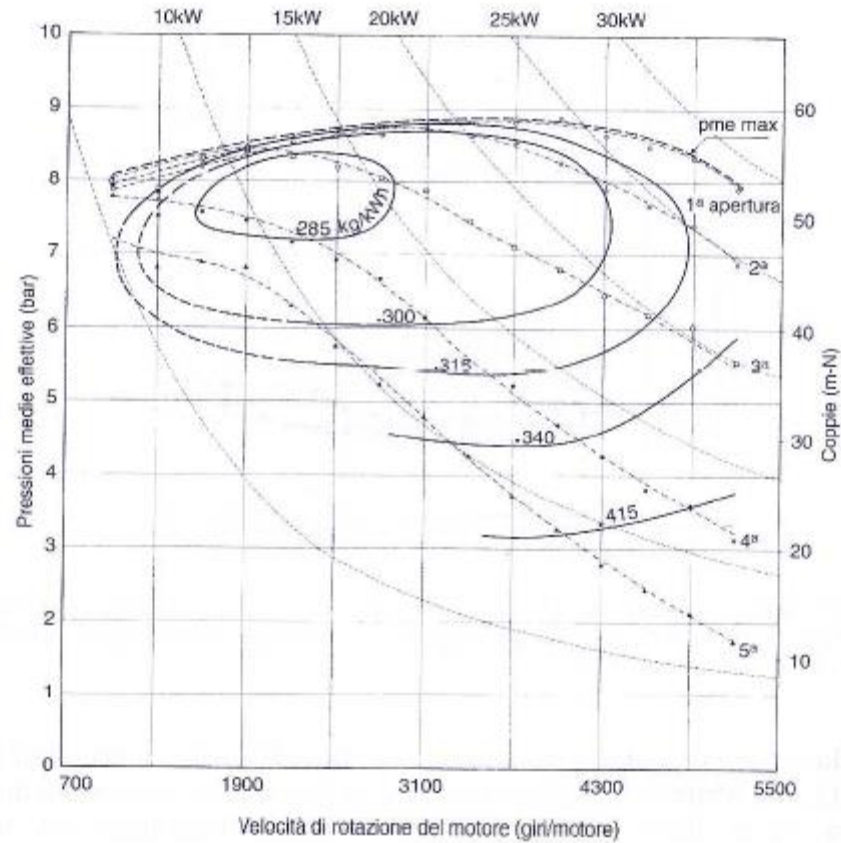


Figura 6.26: Piano quotato dei consumi per un motore AC.

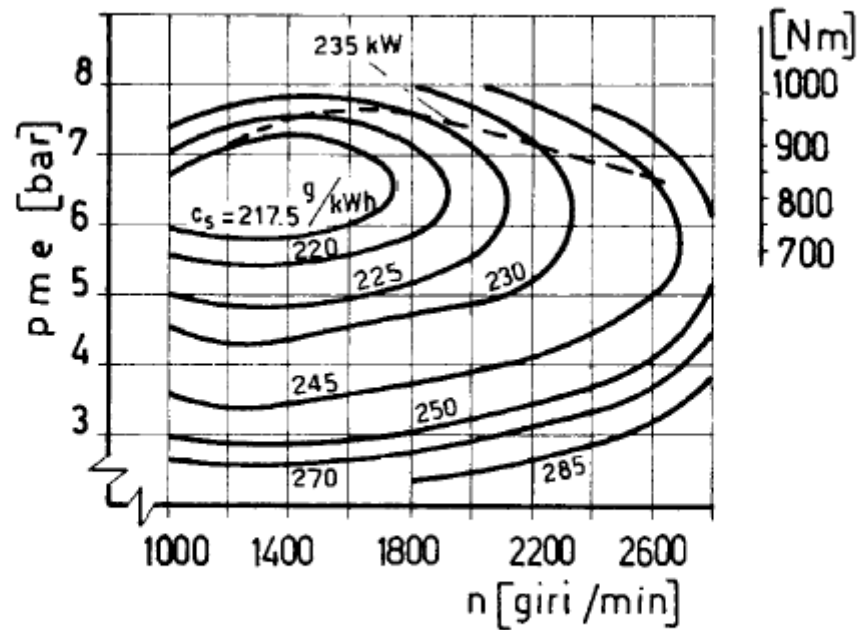
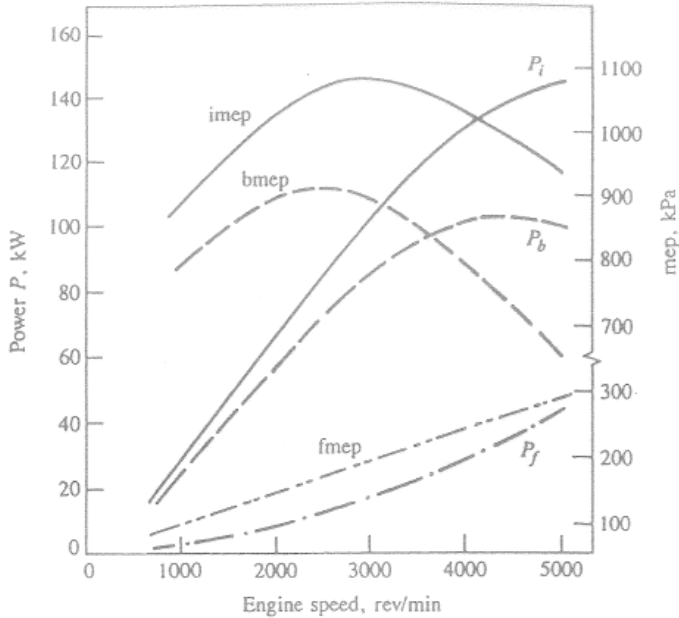


Figura 6.27: Piano quotato dei consumi per un motore AS.



- Spark ignition
- wide-open throttle
- $V = 3800 \text{ cm}^3$
- $r = 6$

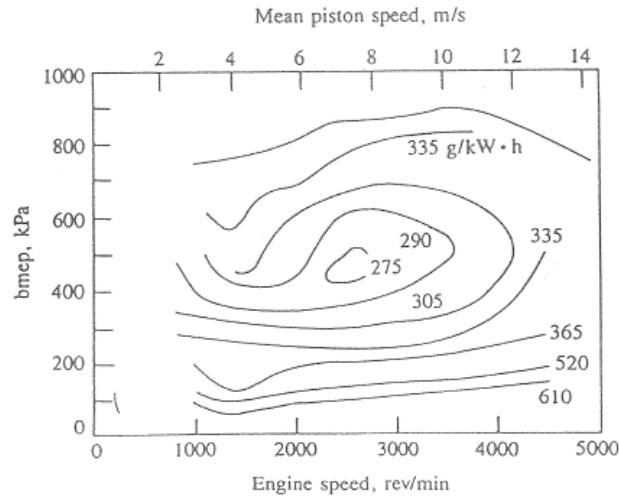
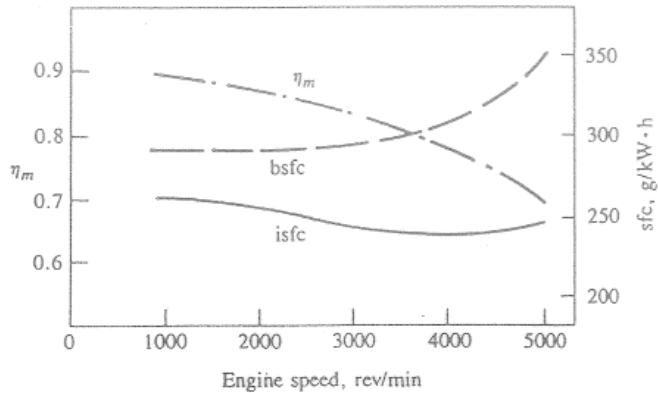


FIGURE 15-10 Performance map for 2-dm<sup>3</sup> four-cylinder fast-burn spark-ignition engine showing contours of constant bsfc in grams per kilowatt-hour.<sup>13</sup>

FIGURE 15-1

Gross indicated, brake, and friction power ( $P_i$ ,  $P_b$ ,  $P_f$ ), indicated, brake, and friction mean effective pressure, indicated and brake specific fuel consumption, and mechanical efficiency for 3.8-dm<sup>3</sup> cylinder automotive spark-ignition engine at wide-open throttle. Bore = 96.8 mm, stroke = 86 mm,  $r_c = 8.6$ .<sup>1</sup>

# Prestazioni dei motori

## CAMPI DI APPLICAZIONE

MOTORI A CICLO OTTO: CAMPO BASSE POTENZE (PL 1000 kW)  
 ALTE POTENZE SPECIFICHE, BASSI INGOMBRI  
 PESI RIDOTTI

AUTOTRAZIONE LEGGERA  
 IMBARCAZIONI  
 AEROMOBILI

MOTORI A CICLO DIESEL: CAMPO POTENZE MEDIO-ALTE  
 GRANDE IMPORTANZA DEI COSTI DI ESERCIZIO

AUTOTRAZIONE PESANTE  
 APPLICAZIONI MARITIME  
 APPLICAZIONI FERROVIARIE  
 IMPIANTI FISSI (EN. ELETTRICA)  
 " " (COGENERAZIONE)

Tabella 1.1 Parametri caratteristici di motori tipici per diversi campi d'applicazione

Tipo di motore	P <sub>max</sub> [kW]	D [mm]	n [rpm]	C/D	η <sub>me</sub> [%]
<b>Motocicli:</b>					
Otto 2 tempi	120+160	45+70	0,8+1,0	16+20	10+15***
Otto 4 tempi	100+160	50+80	0,7+0,9	15+18	9+11
<b>Gruppi mobili:</b>					
Otto 2 tempi	100+140	40+70	0,8+1,0	14+18	8+12***
Diesel 4 tempi	70+80	70+80	0,9+1,1	10+14	10+21
<b>Autovetture:</b>					
Otto 4 tempi	90+110	70+100	0,8+1,0	11+16	9+11
Diesel 4 tempi	70+80	80+100	1,0+1,1	11+13	20+23
<b>Trasporto:</b>					
Diesel 4 t. asp.	35+45	90+130	1,0+1,2	9+13	17+20
Diesel 4 t. sovr.	35+40	90+140	1,1+1,3	9+13	16+17
<b>Media velocità: *</b>					
Diesel 4 t. sovr.	10+30	150+400	1,1+1,4	8+11	15+16
<b>Motori lenti: **</b>					
Diesel 2 t. sovr.	1,2+2,4	550+850	2+3,6	6+8	13+15

\* Per applicazioni marine, ferroviarie, impianti fissi.

\*\* Per applicazioni marine o impianti fissi.

\*\*\* Rapporti di compressione geometrici, equivalenti a rapporti effettivi (a partire da r<sub>CS</sub>) di 6+8.

segue Tabella 1.1 Parametri caratteristici di motori tipici per diversi campi d'applicazione

Tipo di motore	P <sub>max</sub> [kW]	D [mm]	n [rpm]	C/D	η <sub>me</sub> [%]
<b>Motocicli:</b>					
Otto 2 tempi	0,7+1,0	20+25	100+200	0,8+1,5	1+2
Otto 4 tempi	0,9+1,1	25+30	70+100	1+2	
<b>Gruppi mobili:</b>					
Otto 2 tempi	0,6+0,8	20+26	60+100	1+1,5	
Diesel 4 tempi	0,7+0,9	30+35	30+50	3+6	
<b>Autovetture:</b>					
Otto 4 tempi	0,8+1,4	28+36	40+70	1+2	
Diesel 4 tempi	0,7+1,2	30+38	25+35	3+4	
<b>Trasporto:</b>					
Diesel 4 t. asp.	0,7+0,9	36+44	16+20	4+8	
Diesel 4 t. sovr.	1,1+1,4	40+46	20+25	3+6	
<b>Media velocità: *</b>					
Diesel 4 t. sovr.	1,5+2,2	42+48	10+22	8+15	
<b>Motori lenti: **</b>					
Diesel 2 t. sovr.	1,6+1,8	47+53	2+5	20+40	

\* Per applicazioni marine, ferroviarie, impianti fissi.

\*\* Per applicazioni marine o impianti fissi.

**TABLE 15.4**  
**Performance of representative engines in different categories**

Engine type†	Bore, mm	Stroke, mm	Stroke/bore	$r_c$	Volume per cylinder, dm <sup>3</sup>	Number of cylinders	Maximum torque		Rated maximum power			Maximum efficiency		Reference	
							bmep, kPa	Speed, rev/min	bmep, kPa	Speed, rev/min	Boost pressure ratio	$S_p$ , m/s	bsfc g/kW·h		$\eta_{f,b}$
SI/4S/NA	96.8*	86	0.88	8.6	0.632	6	910	2500	750	4300	—	12.3			1
SI/4S/NA	84.5	88	1.04	8.5	0.494	4	966	2800	767	5200	—	15.3			67
SI/4S/NA	86*	86*	1*	8.5*	0.5	4	910	3500	758	5000	—	14.3	274	0.30	13
SI/4S/NA	96	80	0.83	9.5	0.579	4	998	2800	796	5400	—	14.4			52
SI/4S/TC	92	80	0.87	7.5	0.532	4	1241	3800	1024	5400	1.6*	14.4			52
SI/4S/TCAC	96	80	0.83	8.7	0.579	4	1356	2900	1144	5300	1.6	14.1			52
SI/2S/C	58	56	0.97		0.144	3	654	3500	575	4500		8.4	~400*	~0.2	64
SI/2S/C	64	54	0.84		0.174	2	686	7000	590	8200		14.8	~340*	~0.24	63
IDI/4S/NA	76.5	86.4	1.13	23	0.397	5	850	3100	670	4800	—	13.8	280	0.30	35
IDI/4S/NA	84	82	0.98	22	0.454	4	675	2000	502	5000	—	13.7			4
IDI/4S/NA	102	100	0.98	19	0.817	4	848	2200	743	3500	—	11.7	251	0.34	46
IDI/4S/TC	76.5	86.4	1.13	23	0.397	6	1080	2400	840	4800	1.7	13.8	240	0.35	54
DI/4S/NA	76.5	80	1.05	18.5	0.368	4	735	2800	600	5000	—	13.3	246	0.34	34
DI/4S/NAA	102	100	0.98	18	0.817	8	784	2000	682	3200	—	10.7	220	0.39	33
DI/4S/NA	102	100	0.98	17	0.817	4	886	2200	782	3500	—	11.7	221	0.38	46
DI/4S/NA	115	135	1.17	16	1.40	6	851	1400	777	2700	—	12.2	204	0.42	3
DI/4S/NA	135	140	1.04		2.00	6	862	1400	763	2500	—	11.7			57
DI/4S/TC	115	135	1.17		1.40	6	1098	1500	941	2500		11.2	203	0.42	3
DI/4S/TCAC	115	135	1.17		1.40	6	1344	1600	1240	2300		10.4			3
DI/4S/TCAC	128	140	1.09	15	1.8	6–16	1560	1500	1280	2100	2.5	9.8	195	0.43	58
DI/4S/TC	135	140	1.04	16	2.00	6	1087	1300	911	2300	1.9	10.7	210	0.40	57
DI/4S/2TCAC	140	152	1.09		2.33	6	1740	1400	1445	2100	3	10.6	207	0.41	60
DI/4S/TCAC	400	480	1.20		60.3	6–18			2190	580		9.3	185	0.46	62
DI/2S/TC	98.4	114.3	1.16	18	0.870	3, 4, 6	1065	1500	952	2500	2.6	9.5	226	0.37	66
DI/2S/TC	230	279.4	1.21	16	11.6	8–20			920–1122	900	2.8	8.4	200	0.42	65
DI/2S/TCAC	380–840	1100–2900	2.9–3.4		125–1607	4–12			1660	196–90	3.5	7.2	180–160	0.47–0.53	62

† Engine type: SI = spark-ignition; IDI = indirect-injection compression-ignition; DI = direct-injection compression-ignition; 4S = four-stroke; 2S = two-stroke; NA = naturally aspirated; NAA = NA and air-cooled; C = crankcase compression of scavenging mixture; TC = turbocharged; TCAC = turbocharged and aftercooled; 2TC = two-stage turbocharged.

\* Denotes estimated value.

# Motori a combustione interna per la produzione di energia alimentati ad OLIO VEGETALE

$k$	Wärtsilä Internal Combustion Engines	$P_{el}$ [kW <sub>el</sub> ]	$\eta_{el}$
1	18V46	17016	46.9
2	16V46	15163	46.9
3	12V46	11349	46.8
4	20V32	8924	46.0
5	9L46	8512	46.8
6	18V32	8032	45.3
7	16V32	7124	45.2
8	12V32	5327	45.1
9	9L32	3974	43.9
10	8L32	3533	43.9
11	6L32	2636	43.7
12	9L20	1539	41.7
13	8L20	1368	41.5
14	6L20	1026	41.9

## WÄRTSILÄ 20

Technical data	Unit	6L20	8L20	9L20
Technical data 50 Hz/1000 rpm				
Power, electrical	kW	1026	1368	1539
Heat rate	kJ/kWh	8584	8670	8627
Electrical efficiency	%	41.0	41.5	41.7
Technical data 60 Hz/900 rpm				
Power, electrical	kW	969	1292	1454
Heat rate	kJ/kWh	8541	8627	8584
Electrical efficiency	%	42.2	41.7	41.9
Dimensions and weight (generating set with liquids and 150 mm high spring elements)				
Length	mm	5400	6540	6920
Width	mm	1850	1950	1950
Height	mm	2375	2620	2620
Weight	tonne	19	24	25

Technical data is based on: Electrical output at generator terminals, including engine-driven pumps, ISO conditions and IHV Tolerance 5%. Power factor 0.8.

## WÄRTSILÄ 46

Technical data	Unit	6L46	12V46	16V46	18V46
Technical data 50 Hz/500 rpm					
Power, electrical	kW	8512	11349	15163	17076
Heat rate	kJ/kWh	7802	7892	7876	7889
Electrical efficiency	%	46.8	46.8	46.9	46.9
Technical data 60 Hz/514 rpm					
Power, electrical	kW	8512	11349	15163	17076
Heat rate	kJ/kWh	7802	7892	7876	7889
Electrical efficiency	%	46.8	46.8	46.9	46.9
Dimensions and weight (generating set with liquids and 150 mm high spring elements)					
Length	mm	15400	16400	17800	18200
Width	mm	3300	5090	5090	5090
Height	mm	5400	5700	5785	5885
Weight	tonne	235	268	320	369

Technical data is based on: Electrical output at generator terminals, including engine-driven pumps, ISO conditions and IHV Tolerance 5%. Power factor 0.8.





## Dati tecnici

Configurazione	In linea
Alasaggio (mm)	135
Corsa (mm)	145
Cilindrata/cilindro (lit)	2.08
Velocità (giri/min)	1500 (50 Hz)
1800 (60 Hz)	
Velocità media del pistone (m/s)	7.3 (1500 giri/min)
8.7 (1800 giri/min)	
Oggetto della fornitura	Gruppo elettrogeno, sistema di cogenerazione, gruppo elettrogeno/cogenerazione in container
Tipi applicabili di gas	Gas naturale, gas di torcia, propano, biogas, gas di discarica, gas di fognatura. Gas speciali (ad es., gas di miniera, gas di coke, gas di legna, gas di pirolisi)
Tipo di motore	J208 GS
Nr. di cilindri	8
Cilindrata totale (lit)	16,6
<b>Dimensioni l x p x a (mm)</b>	
Gruppo elettrogeno	4900 x 1700 x 2000
Sistema di cogenerazione	4900 x 1700 x 2000
Container da 20 piedi (gruppo elettrogeno)	6100 x 2500 x 2600
Container da 40 piedi (cogenerazione)	12200 x 2500 x 2800
<b>Peso a vuoto (kg)</b>	
Gruppo elettrogeno	5000
Sistema di cogenerazione	5700
Container da 20 piedi (gruppo elettrogeno)	13200
Container da 40 piedi (cogenerazione)	17100

## Potenza erogata e rendimenti

Gas naturale

1500 giri/min | 50 Hz

1800 giri/min | 60 Hz

NOx < 500 mg/Nms 250 mg/Nms	Tipo	1500 giri/min   50 Hz					1800 giri/min   60 Hz				
		Pel (kW) <sub>1</sub>	$\eta_{el}$ (%)	Pth (kW) <sub>1</sub>	$\eta_{th}$ (%)	$\eta_{tot}$ (%)	Pel (kW) <sub>1</sub>	$\eta_{el}$ (%)	Pth (kW) <sub>2</sub>	$\eta_{th}$ (%)	$\eta_{tot}$ (%)
500 mg/Nms	208	330	38.7	361	42.3	81.0	335	37.2	409	45.4	82.6
250 mg/Nms	208	312	37.7	351	42.3	80.0	335	35.8	413	44.1	79.9

Biogás

1500 giri/min | 50 Hz

1800 giri/min | 60 Hz

NOx < 500 mg/Nms	Tipo	1500 giri/min   50 Hz					1800 giri/min   60 Hz				
		Pel (kW) <sub>1</sub>	$\eta_{el}$ (%)	Pth (kW) <sub>2</sub>	$\eta_{th}$ (%)	tot (%)	Pel (kW) <sub>1</sub>	$\eta_{el}$ (%)	Pth (kW) <sub>2</sub>	$\eta_{th}$ (%)	$\eta_{tot}$ (%)
500 mg/Nms	208	249	39.1	299	46.9	86.0					
	208	330	38.7	405	47.5	86.2	335	36.2	397	42.9	79.1

Propano

1500 giri/min | 50 Hz

NOx < 500 mg/Nms 250 mg/Nms	Tipo	Pel (kW) <sub>1</sub>	$\eta_{el}$ (%)	Pth (kW) <sub>2</sub>	$\eta_{th}$ (%)	$\eta_{tot}$ (%)
500 mg/Nms	208	231	34.4	337	50.2	84.6
250 mg/Nms	208	231	33.3	345	49.8	83.1

1) Energia elettrica erogata secondo la norma ISO, condizioni di riferimento standard secondo ISO 30461-1991 e p.f. = 1.0/alternatore bassa tensione secondo VDE 0530 REM con relativa