

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PISA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

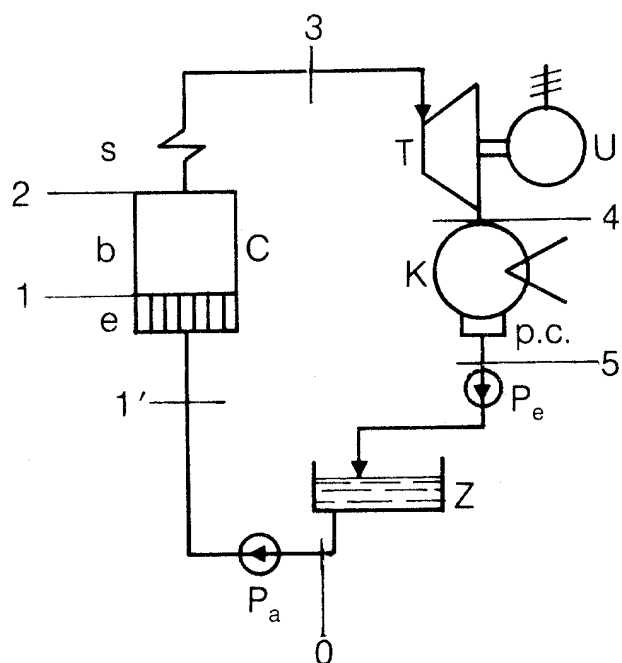
4. Sistemi Termici Motori

Roberto Lensi

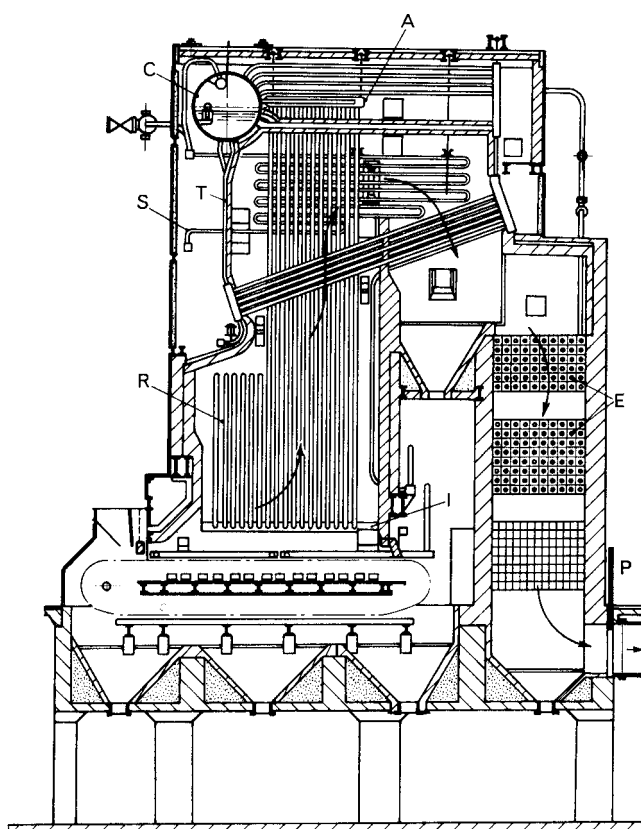
DIPARTIMENTO DI ENERGETICA

Anno Accademico 2002-03

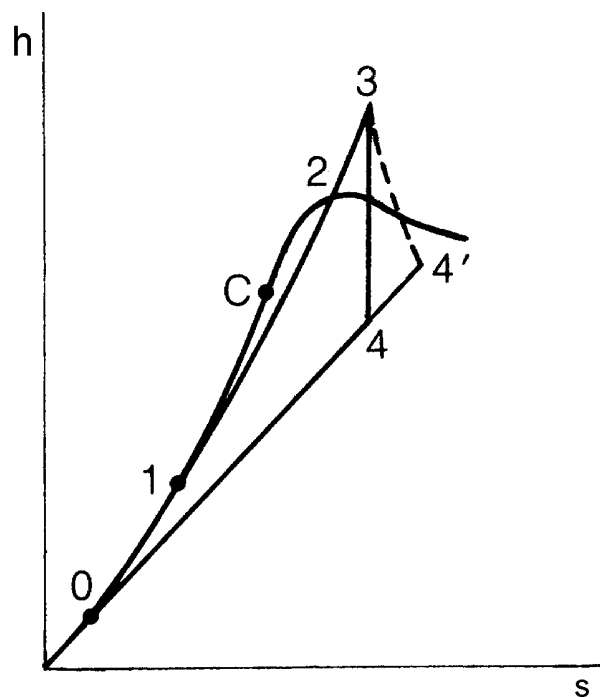
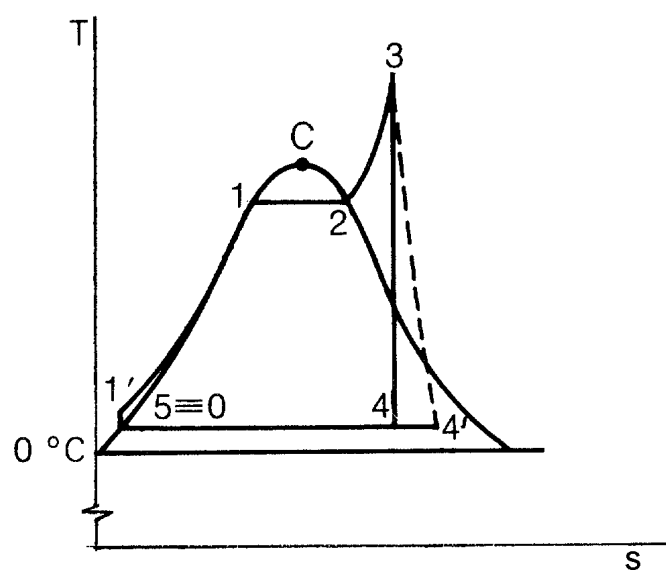
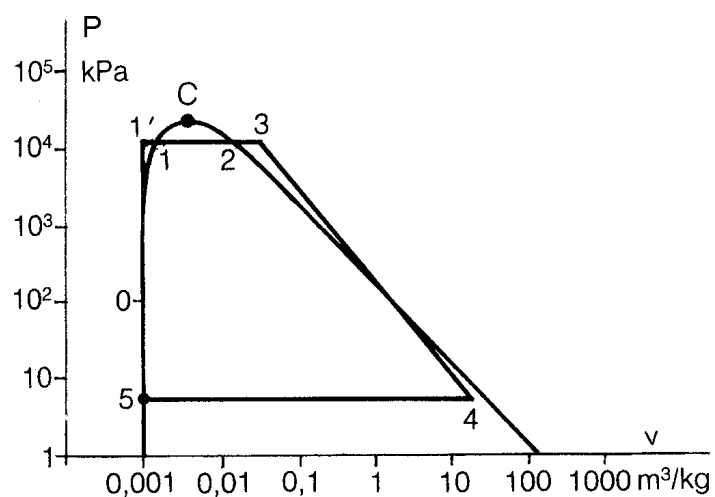
SISTEMA MOTORE A VAPORE

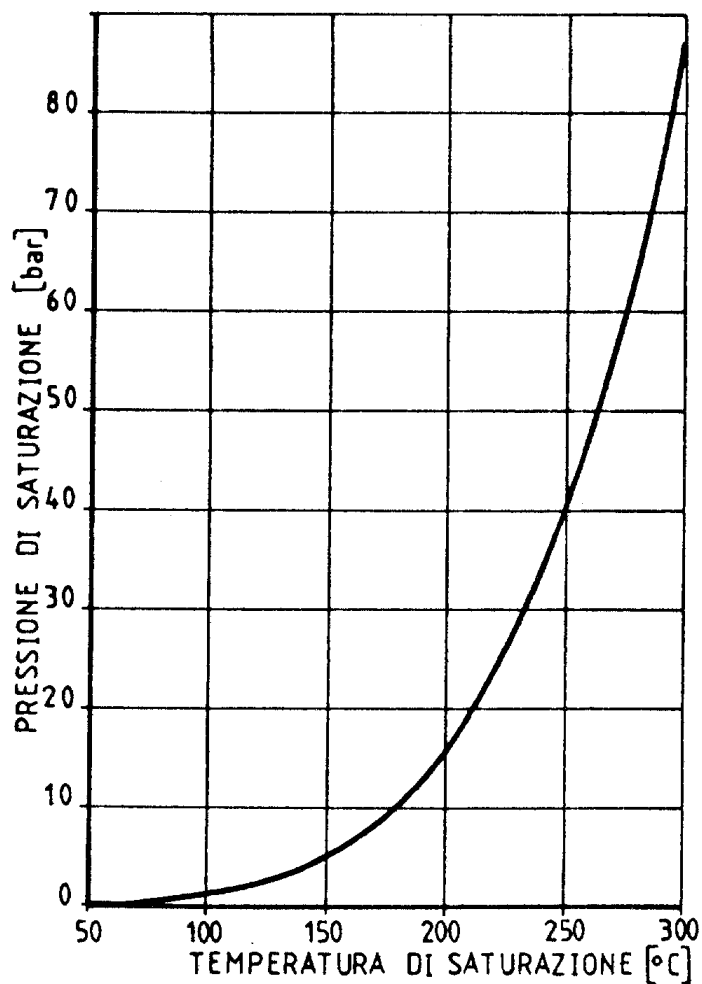


GENERATORE DI VAPORE

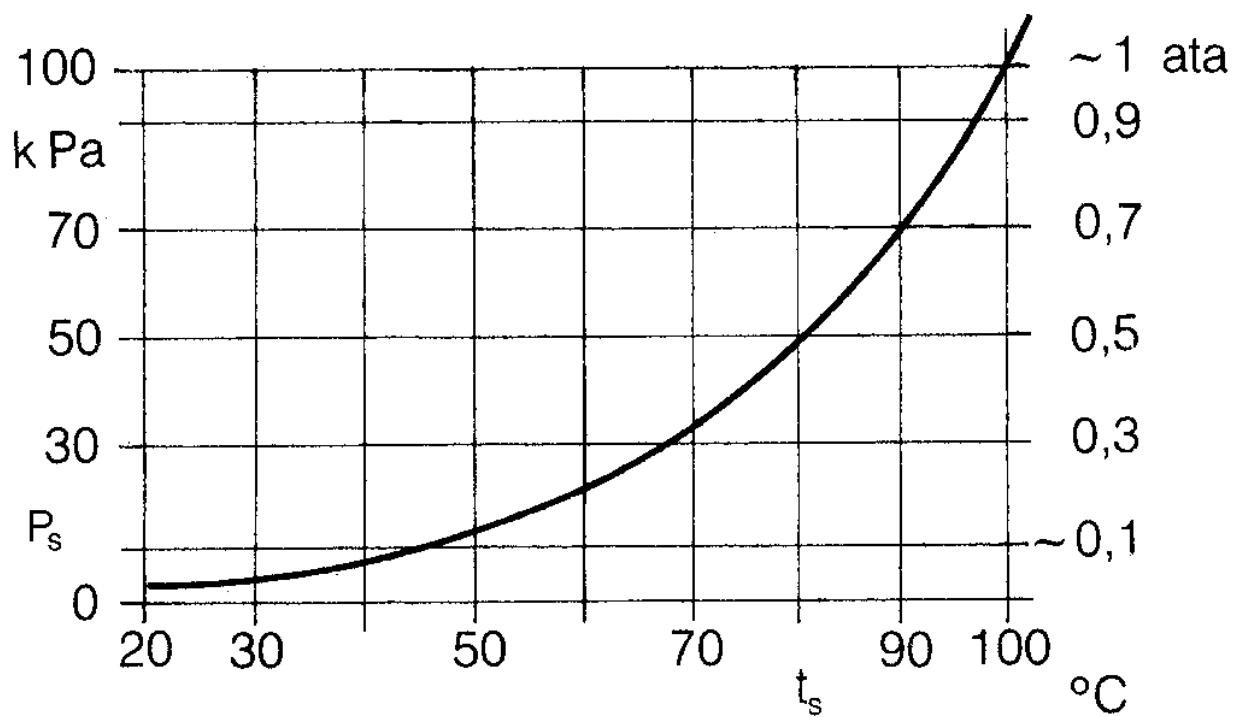


Ciclo Hirn

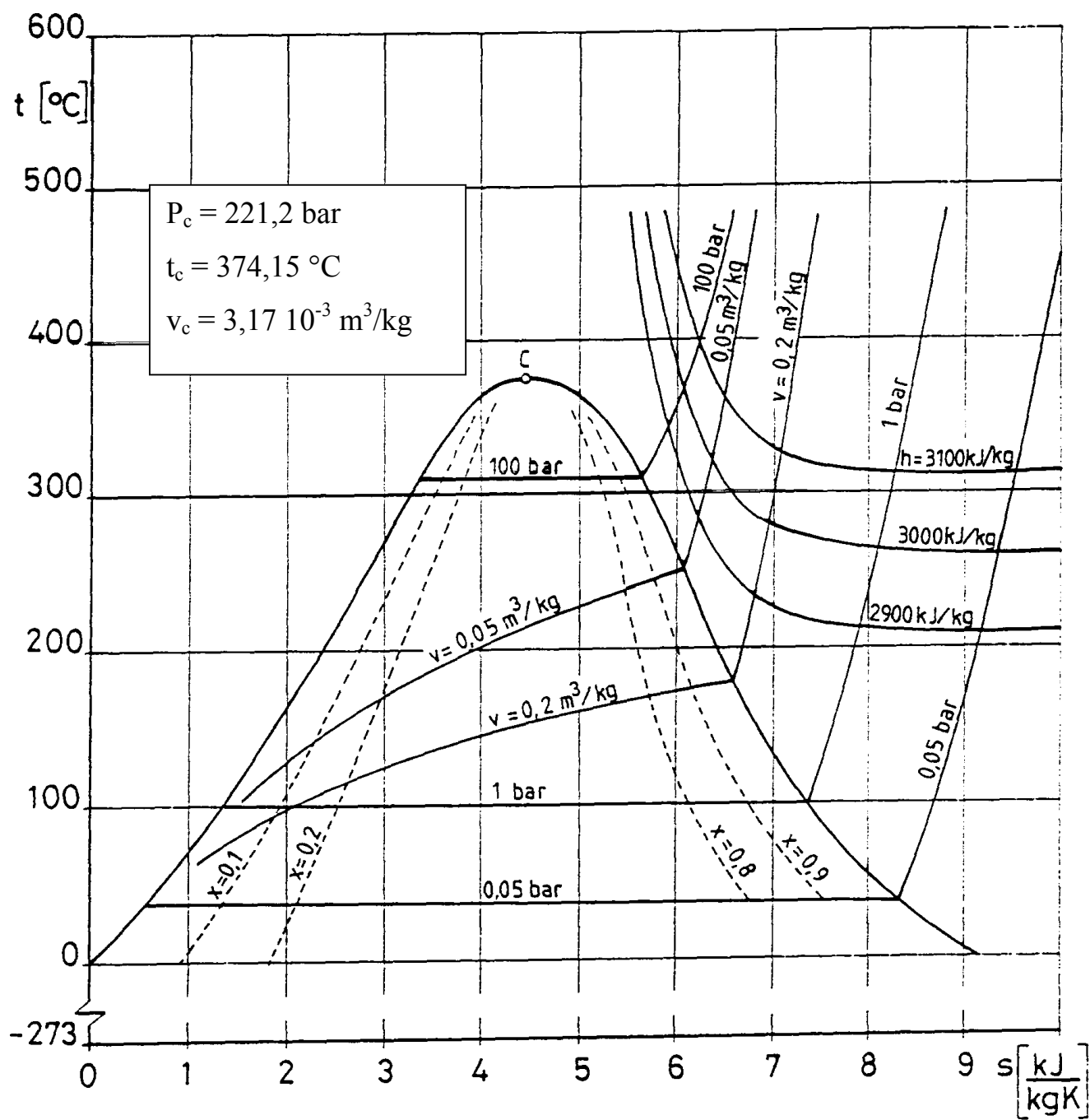




Curva di saturazione dell'acqua



Pressione di condensazione in funzione della temperatura.

Diagramma Ts per l'acqua.

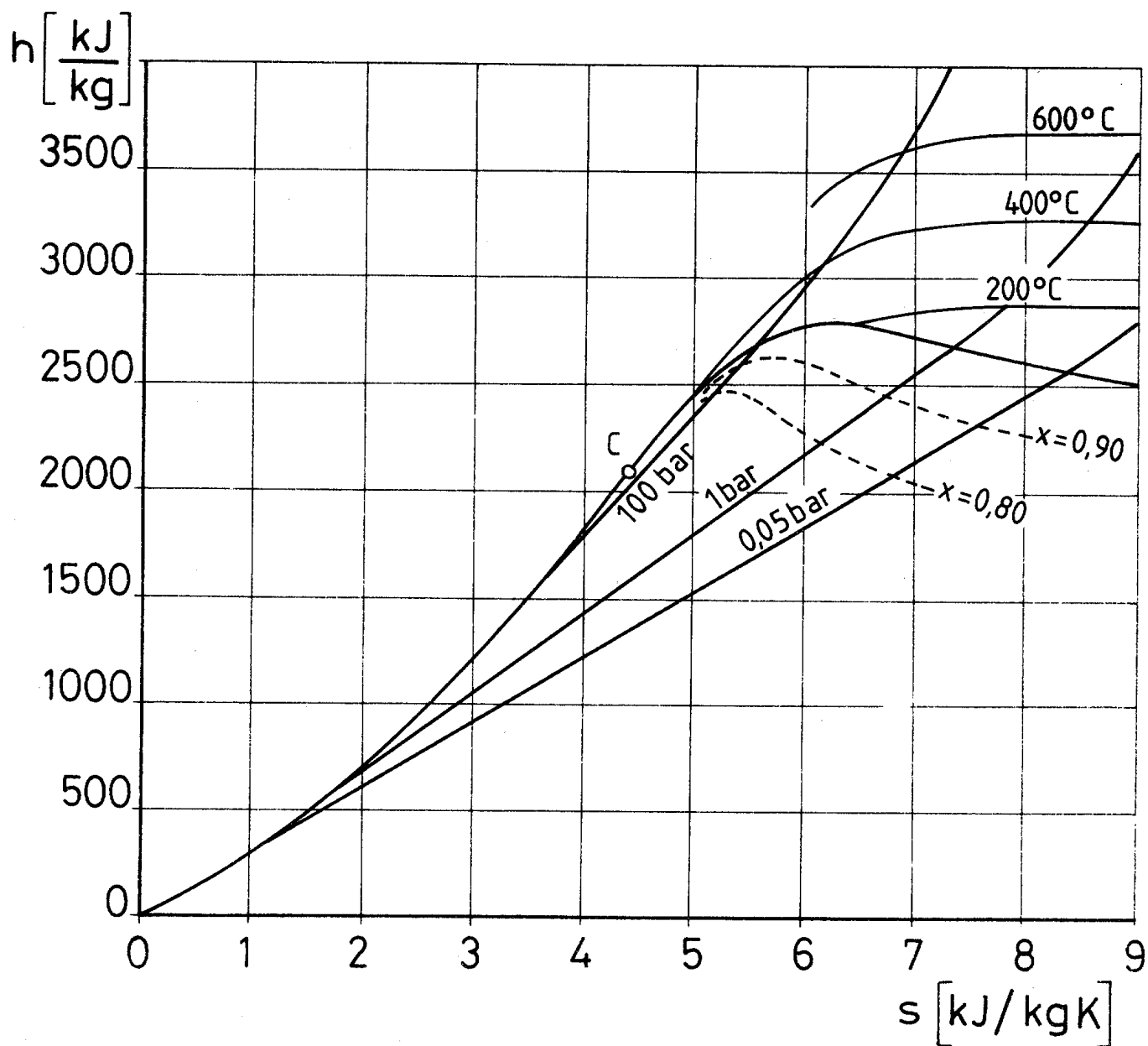


Diagramma di Mollier hs per l'acqua.

t [°C]	P [bar]	v_l [m³/kg]	v_v [m³/kg]	h_l [kJ/kg]	h_v [kJ/kg]	s_l [kJ/kg K]	s_v [kJ/kg K]
20	0,02337	0,0010017	57,84	83,86	2538,2	0,2963	8,6684
30	0,04241	0,0010043	32,93	125,66	2556,4	0,4365	8,4546
35	0,05622	0,0010060	25,24	146,56	2565,4	0,5049	8,3543
40	0,07375	0,0010078	19,55	167,45	2574,4	0,5721	8,2583
50	0,12335	0,0010121	12,05	209,26	2592,2	0,7035	8,0776
60	0,19920	0,0010171	7,679	251,09	2609,7	0,8310	7,9108
70	0,3116	0,0010228	5,046	292,97	2626,9	0,9548	7,7565
80	0,4736	0,0010292	3,409	334,92	2643,8	1,0753	7,6132
88	0,6495	0,0010347	2,536	368,53	2656,9	1,1693	7,5058
90	0,7011	0,0010361	2,361	376,94	2660,1	1,1925	7,4799
100	1,0133	0,0010437	1,673	419,06	2676,0	1,3069	7,3554
107	1,2941	0,0010494	1,331	448,63	2686,8	1,3853	7,2730
110	1,4327	0,0010519	1,210	461,32	2691,3	1,4185	7,2388
120	1,9854	0,0010606	0,8915	503,72	2706,0	1,5276	7,1293
130	2,7013	0,0010700	0,6681	546,31	2719,9	1,6344	7,0261
140	3,614	0,0010801	0,5085	589,10	2733,1	1,7390	6,9284
150	4,760	0,0010908	0,3924	632,15	2745,4	1,8416	6,8358
160	6,181	0,0011022	0,3068	675,47	2756,7	1,9425	6,7475
170	7,920	0,0011145	0,2426	719,12	2767,1	2,0416	6,6630
180	10,027	0,0011275	0,1938	763,12	2776,3	2,1393	6,5819
190	12,551	0,0011415	0,1563	807,52	2784,3	2,2356	6,5036
200	15,549	0,0011565	0,1272	852,37	2790,9	2,3307	6,4278
240	33,478	0,0012291	0,05965	1037,6	2802,2	2,7020	6,1406
300	85,927	0,0014041	0,02165	1345,0	2751,0	3,2552	5,7081
341	147,89	0,0016476	0,01057	1602,7	2621,0	3,6729	5,3312
350	165,35	0,0017411	0,0080	1671,9	2567,7	3,7800	5,2177

P [bar]	t [°C]	v_l [m³/kg]	v_v [m³/kg]	h_l [kJ/kg]	h_v [kJ/kg]	s_l [kJ/kg K]	s_v [kJ/kg K]
0,05	32,898	0,0010052	28,19	137,77	2561,6	0,4763	8,3960
0,07	39,025	0,0010074	20,53	163,38	2572,6	0,5591	8,2767
0,08	41,534	0,0010084	18,10	173,86	2577,1	0,5925	8,2296
1,0	99,632	0,0010434	1,694	417,51	2675,4	1,3027	7,3598
2,0	120,23	0,0010608	0,8854	504,70	2706,3	1,5301	7,1268
10,0	179,88	0,0011274	0,1943	762,61	2776,2	2,1382	6,5828
15,0	198,29	0,0011539	0,1317	844,67	2789,9	2,3145	6,4406
17,0	204,31	0,0011633	0,1166	871,84	2793,4	2,3713	6,3957
20,0	212,37	0,0011766	0,09954	908,59	2797,2	2,4469	6,3367
30,0	233,84	0,0012163	0,06663	1008,4	2802,3	2,6455	6,1837
40,0	250,33	0,0012521	0,04975	1087,4	2800,3	2,7965	6,0685
50,0	263,91	0,0012858	0,03943	1154,5	2794,2	2,9206	5,9735
60,0	275,55	0,0013187	0,03244	1213,7	2785,0	3,0273	5,8908
70,0	285,79	0,0013513	0,02737	1267,4	2773,5	3,1219	5,8162
90,0	303,31	0,0014179	0,02050	1363,7	2744,6	3,2867	5,6820
100	310,96	0,0014526	0,01804	1408,0	2727,7	3,3605	5,6198
110	318,05	0,0014887	0,01601	1450,6	2709,3	3,4304	5,5595
120	324,65	0,0015268	0,01428	1491,8	2689,2	3,4972	5,5002
130	330,83	0,0015672	0,01280	1532,0	2667,0	3,5616	5,4408
140	336,64	0,0016106	0,01150	1571,6	2642,4	3,6242	5,3803
148	341,06	0,0016481	0,01056	1603,1	2620,7	3,6736	5,3305
150	342,13	0,0016579	0,01034	1611,0	2615,0	3,6859	5,3178
160	347,33	0,0017103	0,009308	1650,5	2584,9	3,7471	5,2531
170	352,26	0,0017696	0,008371	1691,7	2551,6	3,8107	5,1855
180	356,96	0,0018399	0,007498	1734,8	2513,9	3,8765	5,1128
200	365,70	0,0020370	0,005877	1826,5	2418,4	4,0149	4,9412

Proprietà termodinamiche del vapor d'acqua saturo nel Sistema Internazionale.

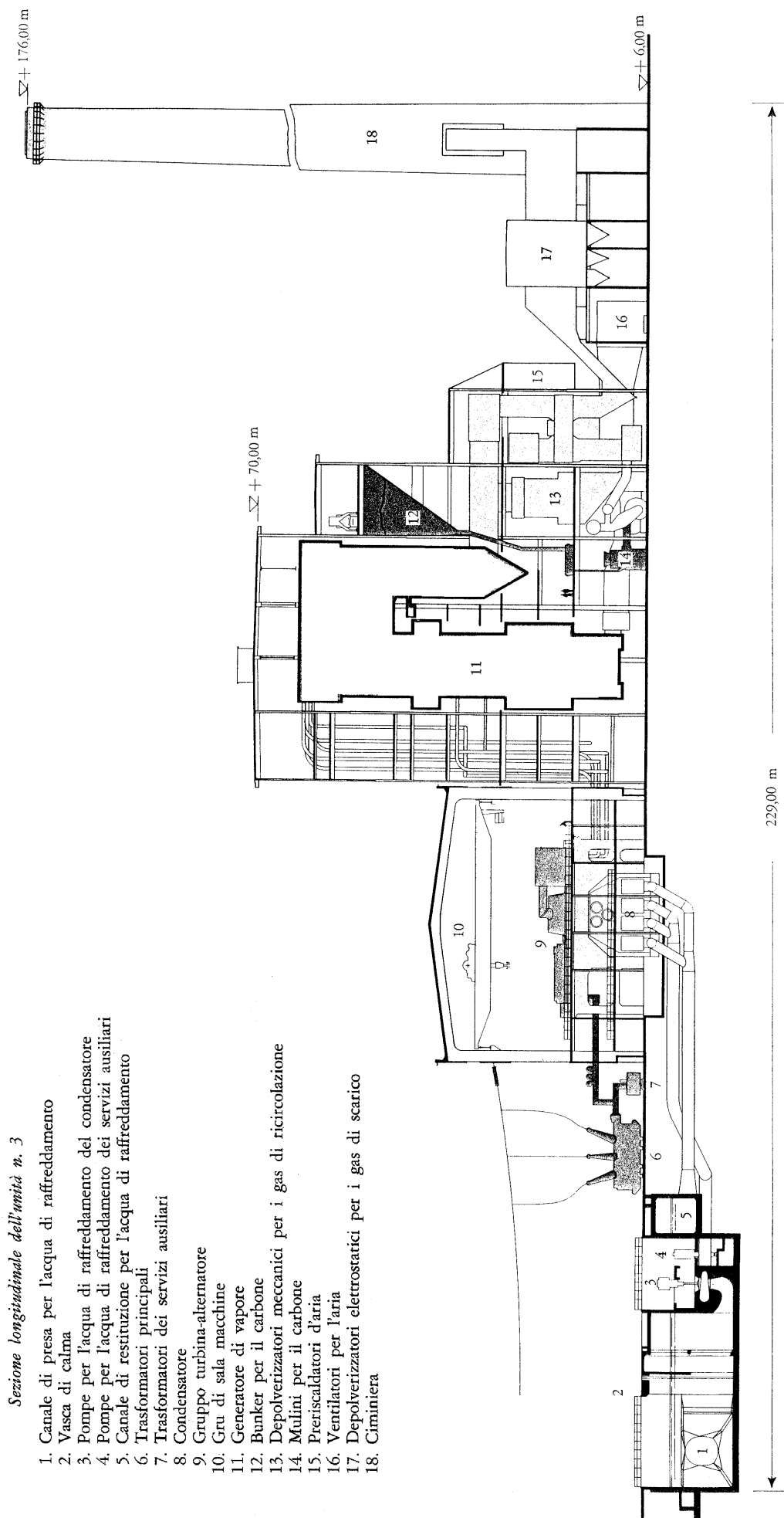
(da E. Schmidt, Springer-Verlag, 1969)

p	t	v [m ³ /kg]	h [kJ/kg]	s [kJ/kg K]
1 bar	160°C	1,984	2796,2	7,6601
4,4 bar	170°C	0,4500	2793,3	6,9815
15 bar	250°C	0,1520	2923,5	6,7099
	260°C	0,1556	2947,3	6,7550
	300°C	0,1697	3038,9	6,9207
	310°C	0,1731	3061,2	6,9592
	320°C	0,1765	3083,3	6,9967
20 bar	250°C	0,1114	2902,4	6,5454
	300°C	0,1255	3025,0	6,7696
	320°C	0,1308	3071,2	6,8487
25 bar	500°C	0,13987	3461,7	7,3240
30 bar	300°C	0,08116	2995,1	6,5422
	350°C	0,09053	3117,5	6,7471
40 bar	300°C	0,05883	2962,0	6,3642
	430°C	0,07735	3285,4	6,8745
	440°C	0,07866	3308,3	6,9069
	500°C	0,08634	3445,0	7,0909
70 bar	550°C	0,05189	3529,6	6,9485
90 bar	460°C	0,03415	3285,3	6,5252
100 bar	500°C	0,03276	3374,6	6,5994
	550°C	0,03560	3499,8	6,7564
150 bar	500°C	0,02080	3310,6	6,3487
160 bar	400°C	0,01427	2951,3	5,8240

Proprietà termodinamiche del vapor d'acqua surriscaldato nel Sistema Internazionale.

(da E. Schmidt, Springer-Verlag, 1969)

CENTRALE TERMOELETTRICA A VAPORE



COMBUSTIBILI INDUSTRIALI

Combustibili solidi: valori tipici della composizione elementare e di alcune proprietà caratteristiche.

Tipo di combustibile	Composizione elementare [kg/kg(c)]						Potere calorifico, 15°C [kJ/kg]		Aria stechiometrica [kg(a)/kg(c)]
	[C]	[H]	[O + N]	[S]	[H ₂ O]	[ceneri]	superiore	inferiore	
Antraciti	0,845	0,02	0,035	0,01	0,03	0,06	31.500	31.000	10,4
Litantraci:									
– a corta fiamma magri	0,82	0,04	0,04	0,01	0,03	0,06	33.200	32.200	10,8
– a corta fiamma grassi	0,81	0,04	0,06	0,01	0,02	0,06	32.600	31.700	10,7
– a lunga fiamma prop. detti	0,76	0,05	0,08	0,01	0,03	0,07	31.100	29.900	10,2
– a lunga fiamma grassi	0,73	0,045	0,11	0,01	0,03	0,075	29.700	28.600	9,7
– a lunga fiamma secchi	0,69	0,055	0,135	0,01	0,035	0,075	29.500	28.200	9,4
Coke da litantrace	0,85	0,01	0,03	0,01	0,025	0,075	30.500	30.200	10,1
Ligniti picee	0,55	0,045	0,16	0,02	0,1	0,125	22.200	20.900	7,42
Ligniti xiloidi	0,40	0,04	0,15	0,01	0,25	0,15	15.900	14.400	5,48
Torbe	0,34	0,055	0,245	0,01	0,25	0,1	14.200	12.300	4,85
Legna	0,37	0,045	0,32	0,005	0,25	0,01	13.800	10.700	4,60

Combustibili liquidi: valori tipici della composizione elementare e di alcune proprietà caratteristiche.

Tipo di combustibile	Composizione elementare* [kg/kg(c)]				Densità a 15°C [kg/dm ³]	Temperatura di infiammabilità** [°C]	Potere calorifico 15°C		Aria stechiom. [$\frac{\text{kg(a)}}{\text{kg(c)}}$]
	[C]	[H]	[S]	[O + N]			superiore [kJ/kg]	inferiore [kJ/kg]	
Petrolio greggio	0,83-0,87	0,115-0,145	0,01-0,02	0-0,03	0,77-0,83	> 20	42.600 ÷ 46.000	40.200 ÷ 43.100	~14,5
Benzina auto	0,855	0,144	0,001	—	0,74	< 0	47.200	44.000	14,8
Cherosene	0,863	0,136	0,001	—	0,79	> 21	46.500	43.500	14,6
Gasolio	0,863	0,127	0,003	0,007	0,88	> 50	45.700	42.900	14,3
Olio comb. fluidissimo	0,862	0,123	0,01	0,005	0,89	> 65	44.600	41.850	14,2
Olio comb. denso BTZ	0,87	0,11	0,01	0,01	0,95	> 65	43.500	41.100	13,8
Olio di catrame (da carbone)	0,895	0,065	0,005	0,03	1,08	70-100	38.950	37.500	12,5
Olio di catrame (da lignite)	0,851	0,122	0,005	0,022	0,825	45-50	44.500	41.800	13,9
Olio Ragusa tipo C	0,854	0,109	0,029	0,008	0,97	107	42.200	39.800	13,7
Olio vegetale	0,772	0,12	0,001	0,107	0,90-0,92	260	41.200	38.550	12,7
Alcol metilico	0,375	0,126	—	0,499	0,79	11	22.650	19.900	6,51
Alcol etilico	0,521	0,131	—	0,348	0,79	12	29.700	26.800	9,01
Benzolo	0,923	0,077	—	—	0,88	< 0	41.800	40.100	13,27
Etere etilico	0,648	0,136	—	0,216	0,72	< 0	36.800	33.800	11,21

* l'eventuale complemento a 1 è [H₂O].

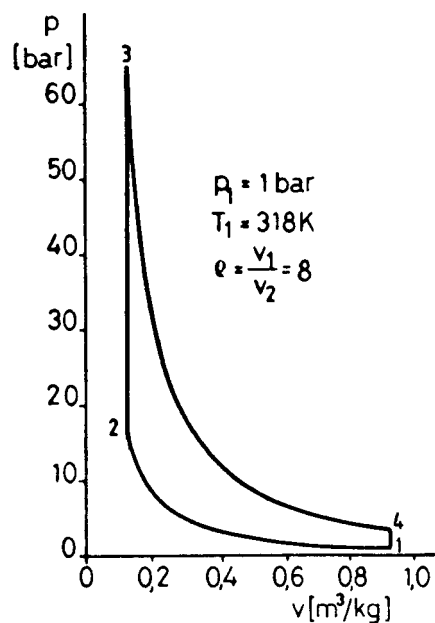
** determinazione secondo ASTM D 56 e D 93.

Combustibili gassosi: valori tipici della composizione volumetrica e di alcune proprietà caratteristiche.

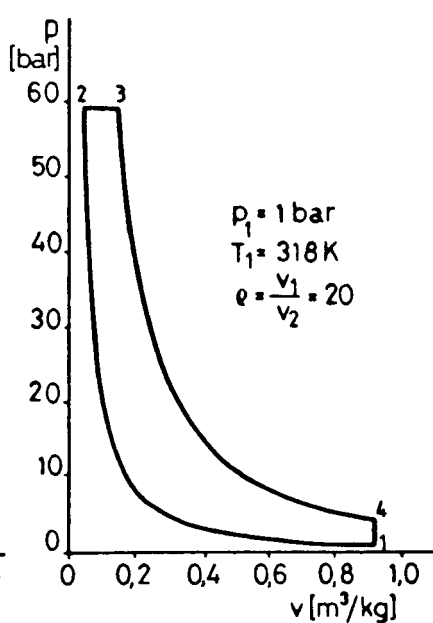
Tipo di combustibile	Composizione volumetrica [m³/m³(c)]								Potere calorifico a 25°C				Densità normale [kg/m _n ³]	Aria stechiometrica		Limiti di infiammabilità a 1 atm e 15°C in aria, [m³(c)/m³]	
	H ₂	CO	CO ₂	N ₂	CH ₄	H ₂ O	O ₂	Altri	superiore	inferiore	superiore	inferiore		[$\frac{kg(a)}{kg(c)}$]	[$\frac{m^3(a)}{m^3(c)}$]	inferiore	superiore
Gas illuminante	0,47	0,07	0,02	0,05	0,35	—	0,01	0,03	40.500	35.100	22.300	19.300	0,55	12,2	5,2	0,05	0,35
Gas da forni da coke	0,60	0,06	0,02	0,09	0,20	—	0,015	0,015	36.200	31.350	17.400	15.050	0,48	9,9	3,7	0,05	0,33
Gas d'acqua (gas. a 700°C)	0,50	0,38	0,04	0,04	—	0,02	—	0,02	17.400	15.850	12.200	11.100	0,70	4,6	2,5	0,12	0,67
Gas povero da coke	0,08	0,26	0,05	0,59	—	0,02	—	—	3.600	3.450	4.300	4.100	1,18	0,89	0,81	—	—
Gas povero da litantrace	0,16	0,26	0,05	0,47	0,03	0,03	—	—	6.200	5.650	6.500	5.950	1,05	1,6	1,3	—	—
Gas d'altoforno	0,03	0,26	0,10	0,53	—	0,08	—	—	2.900	2.750	3.650	3.450	1,25	0,71	0,69	0,35	0,75
Gas naturale (Malossa)	—	—	0,006	0,008	0,890	—	—	0,096*	53.600	46.600	43.400	37.800	0,81	13,5	8,5	—	—
Idrogeno	1	—	—	—	—	—	—	—	141.900	120.000	12.770	10.800	0,090	34,2	2,38	0,04	0,75
Ossido di carbonio	—	1	—	—	—	—	—	—	10.100	10.100	12.630	12.630	1,250	2,46	2,38	0,125	0,74
Metano	—	—	—	—	1	—	—	—	55.550	50.050	39.830	35.890	0,717	17,2	9,52	0,05	0,15
Acetilene	—	—	—	—	—	—	—	1	50.000	48.300	58.550	56.560	1,171	13,1	11,9	0,015	0,82
Propano	—	—	—	—	—	—	—	1	50.400	46.350	101.800	93.630	2,02	15,5	23,8	0,021	0,095
n-Butano	—	—	—	—	—	—	—	1	49.600	45.800	133.900	123.650	2,7	15,4	30,9	0,015	0,085

* C_2H_6 : 0,066; C_3H_8 : 0,021; idrocarburi superiori: 0,009.

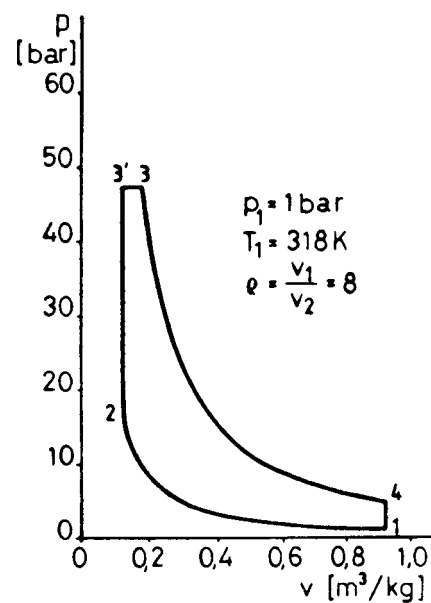
MOTORI VOLUMETRICI A COMBUSTIONE INTERNA



Rappresentazione nel piano $p-v$ del ciclo *Beau de Rochas*.



Rappresentazione nel piano $p-v$ del ciclo *Diesel*.



Rappresentazione nel piano $p-v$ del ciclo *Sabathè*.

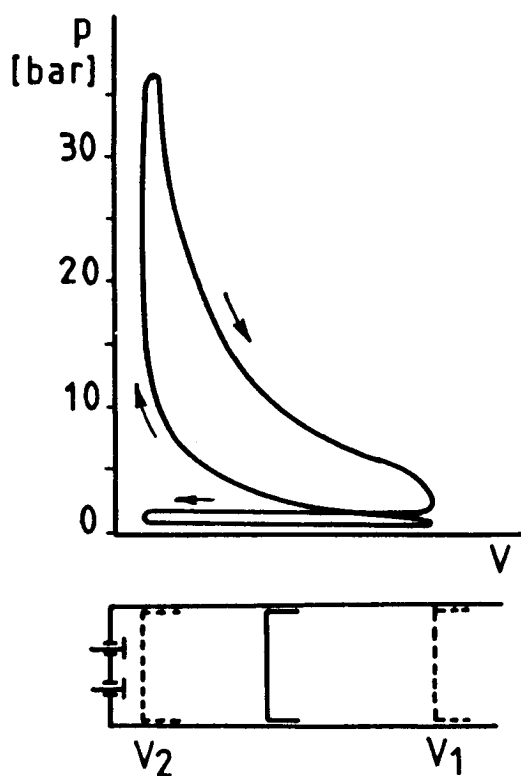


Diagramma indicato di un motore aspirato ad accensione comandata a quattro tempi in coordinate pV .

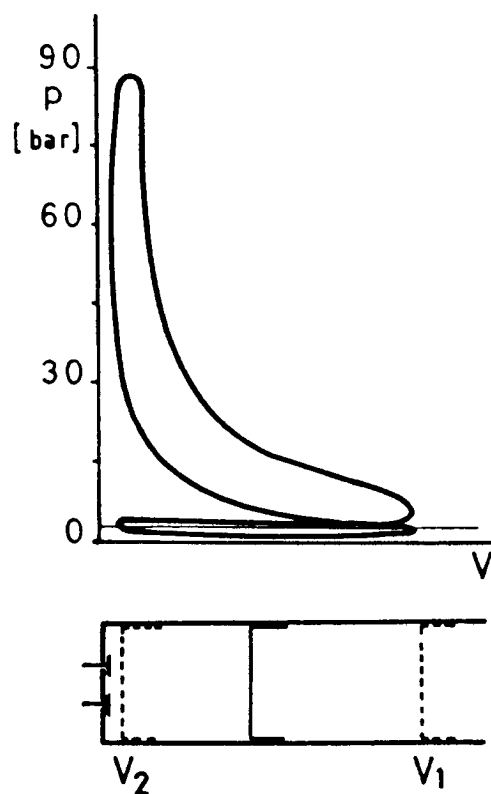
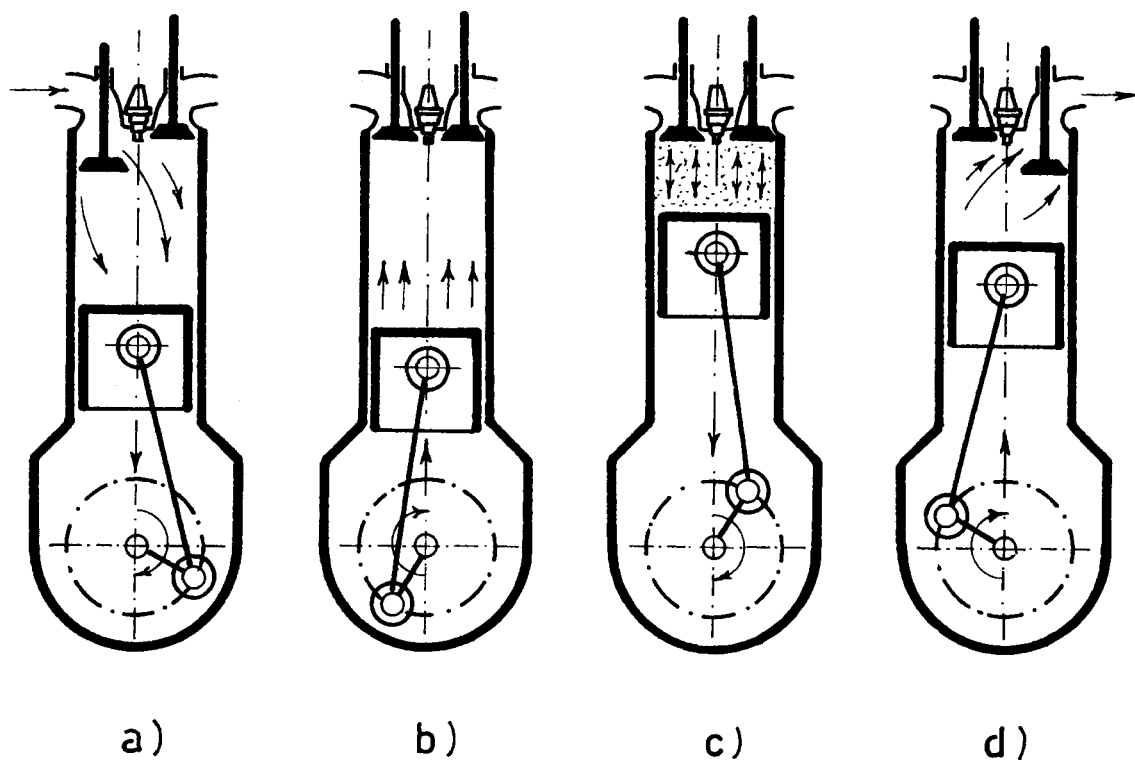
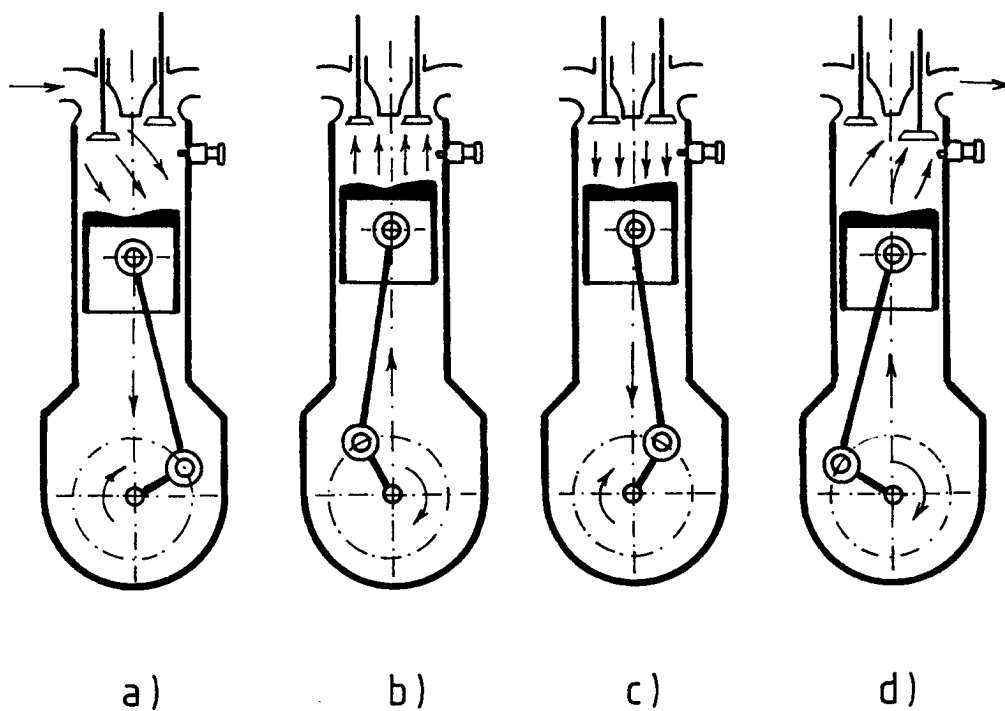


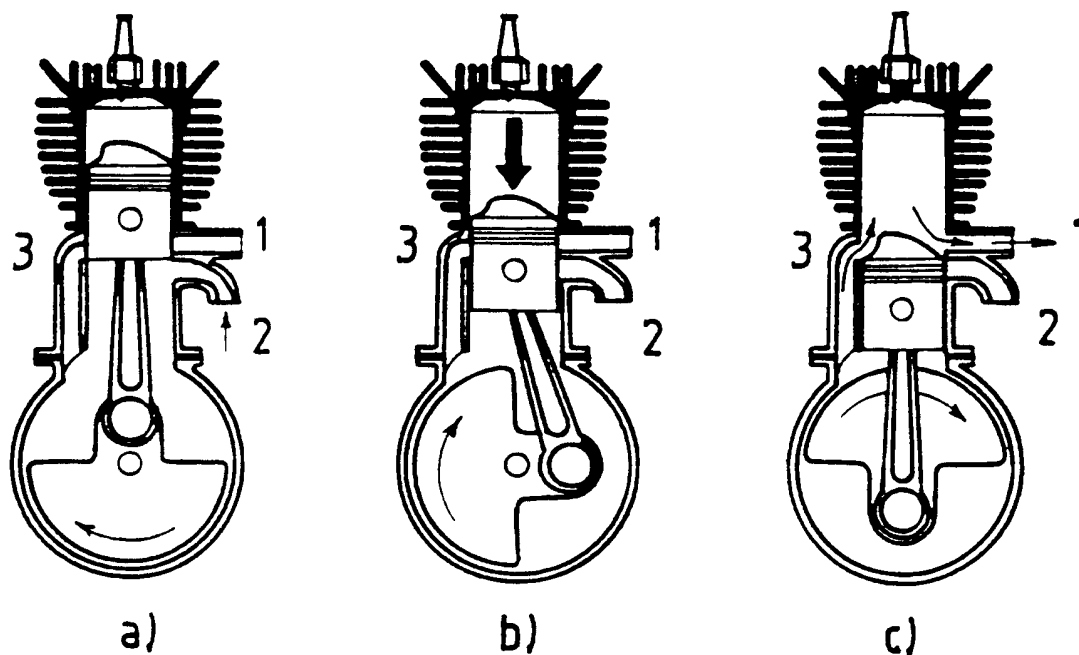
Diagramma indicato di un motore aspirato diesel a quattro tempi in coordinate pV .



Fasi del ciclo di un motore aspirato a quattro tempi ad accensione comandata. a) *Aspirazione*; b) *Compressione*; c) *Combustione ed espansione*; d) *Scarico*.



Fasi del ciclo di un motore aspirato a quattro tempi ad accensione per compressione. a) *Aspirazione*; b) *Compressione*; c) *Iniezione, combustione ed espansione*; d) *Scarico*.



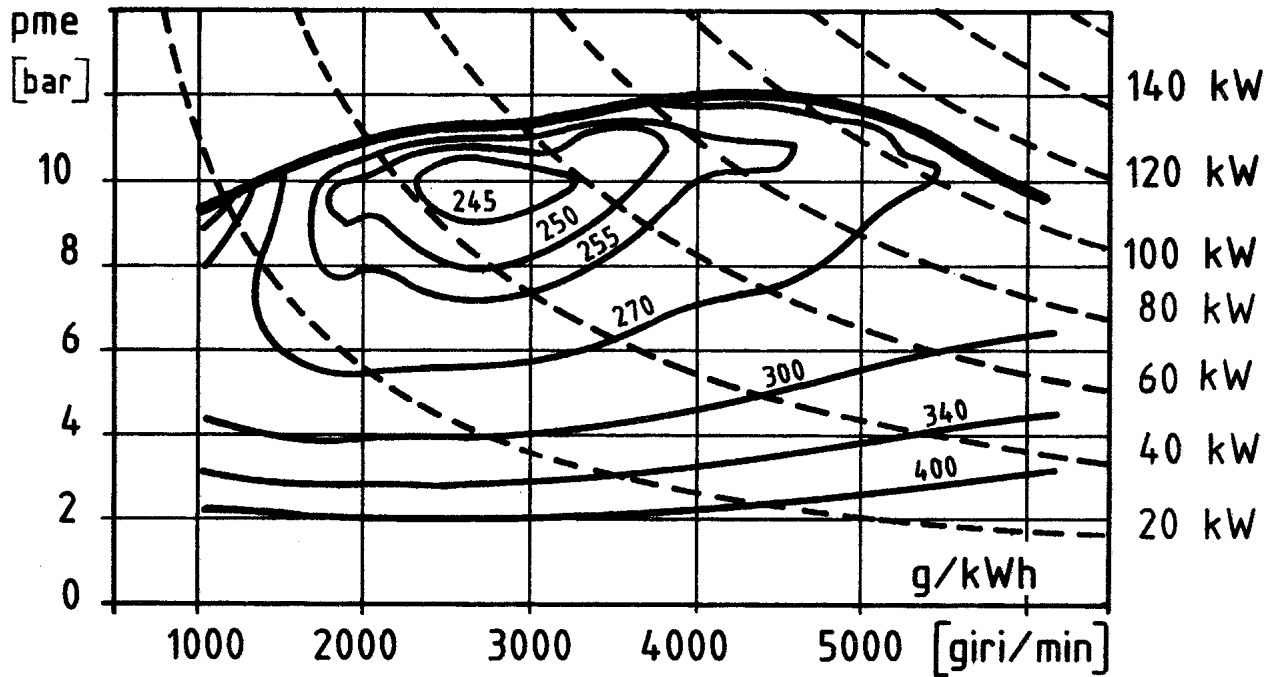
Fasi del ciclo di un motore aspirato a due tempi ad accensione comandata.

a) Aspirazione nel carter e compressione nel cilindro; b) Combustione ed espansione; c) Scarico e riempimento cilindro (lavaggio).

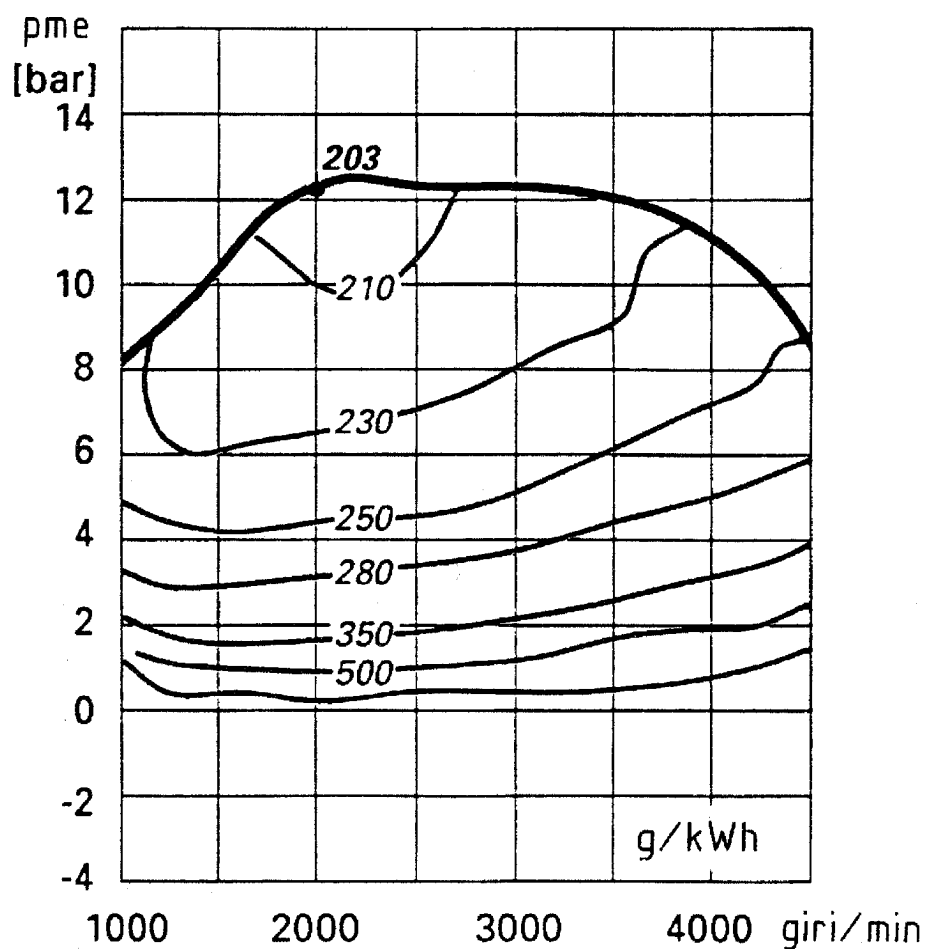
1. Luce di scarico; 2. Luce di aspirazione; 3. Luce di lavaggio.

Valori di alcuni parametri caratteristici del ciclo per motori ad accensione comandata e spontanea.

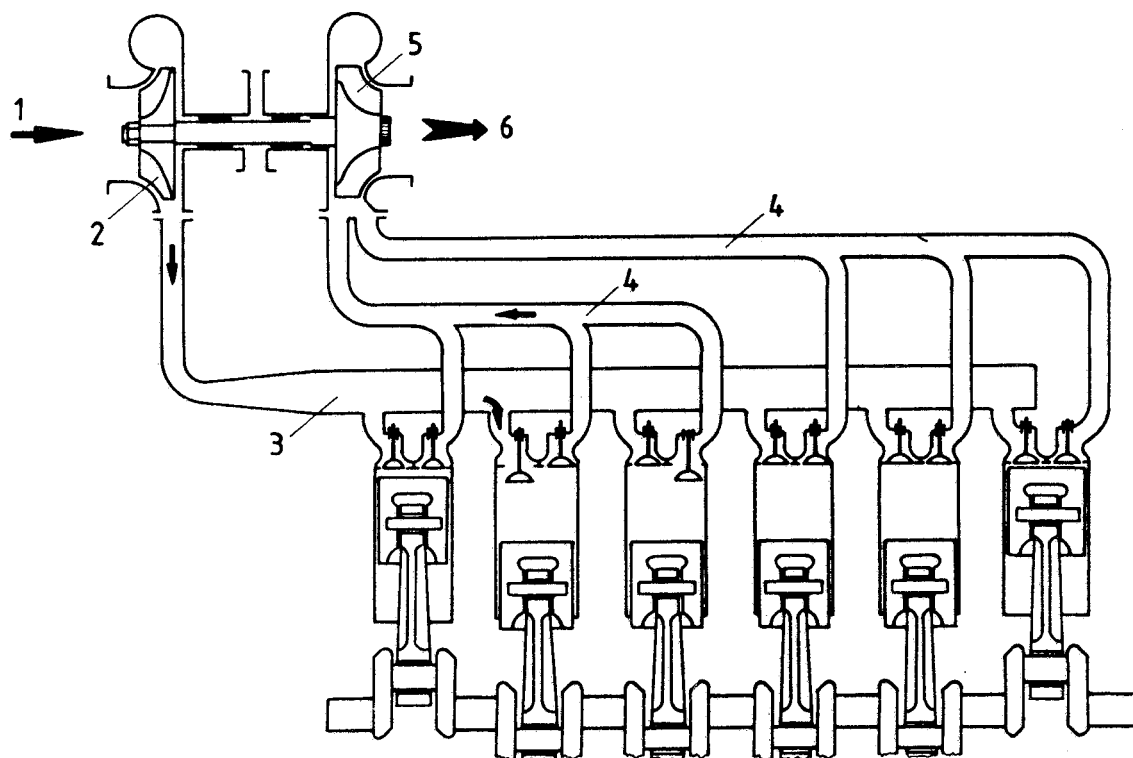
PARAMETRO	MOTORI AD ACC. COMANDATA	MOTORI AD ACC. SPONTANEA
Rapporto di compressione	6 ÷ 11	13 ÷ 23
Pressione di fine compressione	9 ÷ 18 bar	30 ÷ 50 bar
Temperatura di fine compressione	350 ÷ 550°C	700 ÷ 900°C
Pressione massima del ciclo	35 ÷ 50 bar	60 ÷ 90 bar
Temperatura dei gas di scarico a piena ammissione	800 ÷ 1.000°C	600 ÷ 700°C



Piano quotato dei consumi specifici di combustibile di un motore aspirato a quattro tempi ad accensione comandata di 2.000 cm³ di cilindrata totale destinato alla trazione automobilistica.

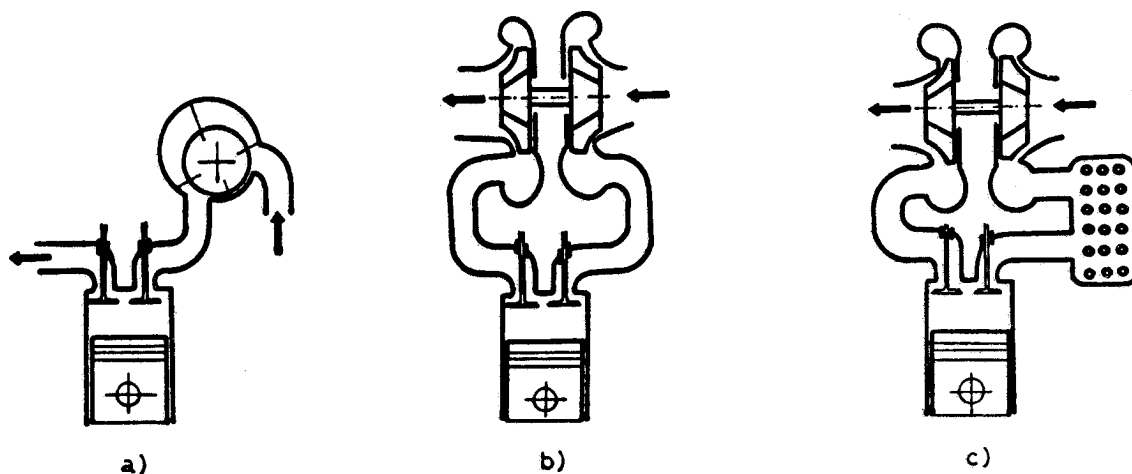


Piano quotato dei consumi specifici di combustibile di un motore diesel a quattro tempi sovralimentato con turbocompressore a gas di scarico munito di *intercooler* e ad iniezione diretta di 1.896 cm³ di cilindrata totale destinato alla trazione automobilistica.



Schema di sovralimentazione mediante turbocompressore.

1. Ingresso aria; 2. Compressore centrifugo; 3. Collettore di immissione aria; 4. Tubazione di collegamento alla turbina dello scarico di un gruppo di tre cilindri; 5. Turbina centripeta; 6. Uscita gas combusti.

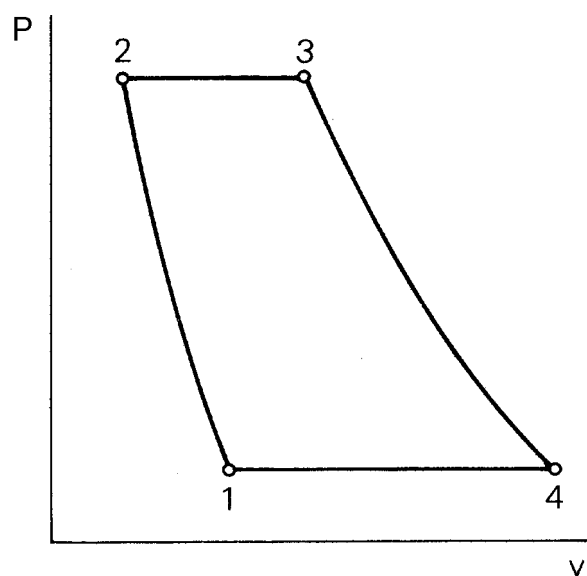


Schema riepilogativo sovralimentazione motori a c.i.

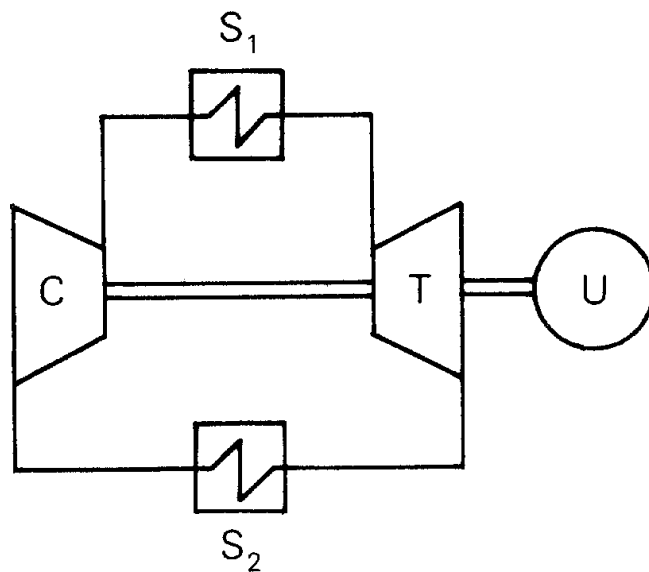
a) Sovralimentazione con compressore volumetrico a comando meccanico; b) Sovralimentazione con turbocompressore; c) Come b) con l'aggiunta dell'intercooler.

MOTORI DINAMICI A GAS

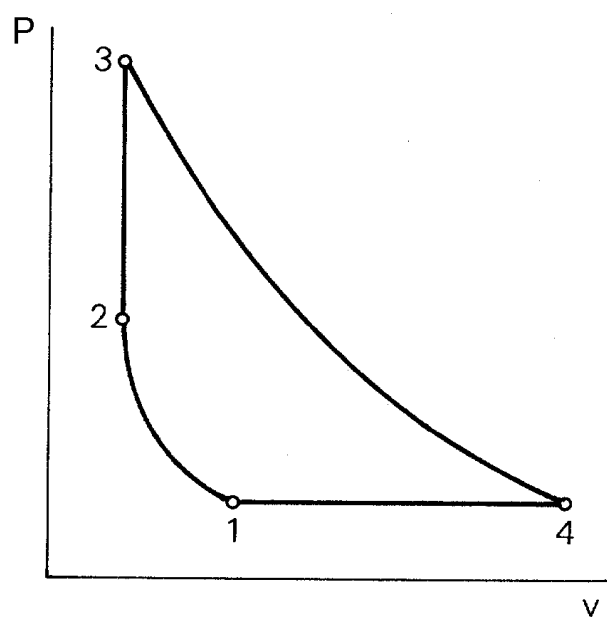
SISTEMI A COMBUSTIONE ESTERNA



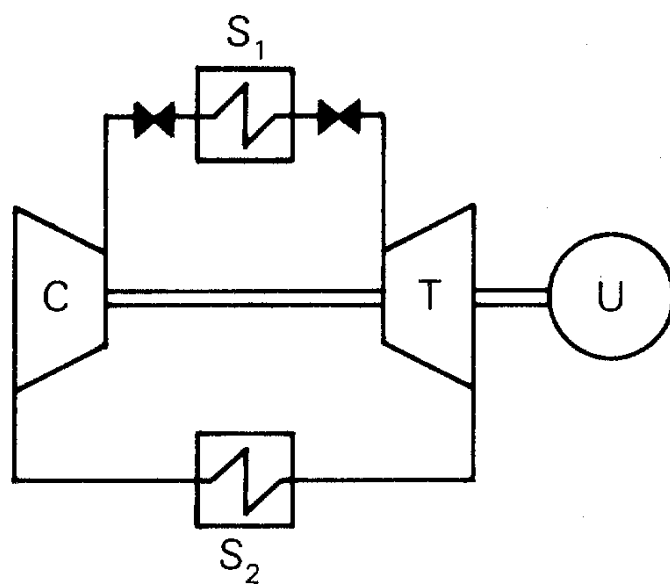
Ciclo Joule (Brayton).



Schema d'impianto in circuito chiuso.

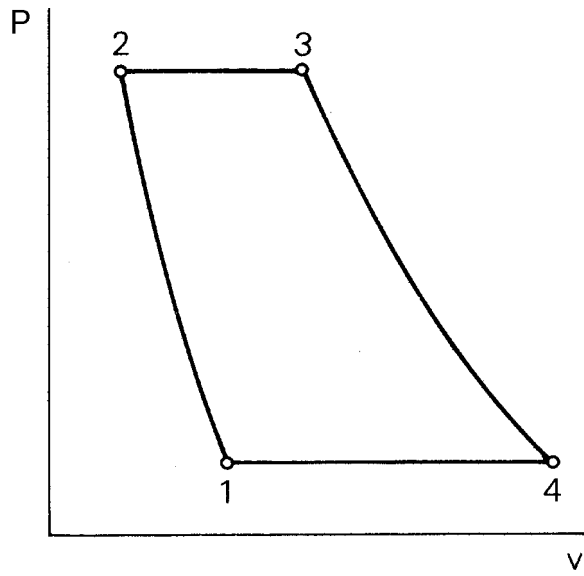


Ciclo Holzwarth.

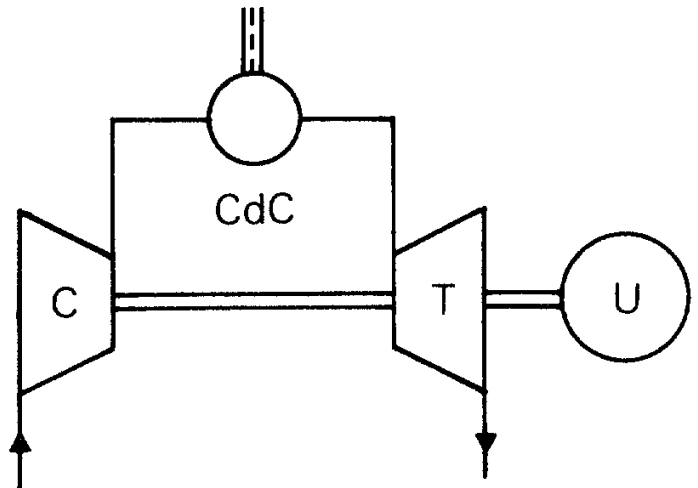


Schema d'impianto in circuito chiuso.

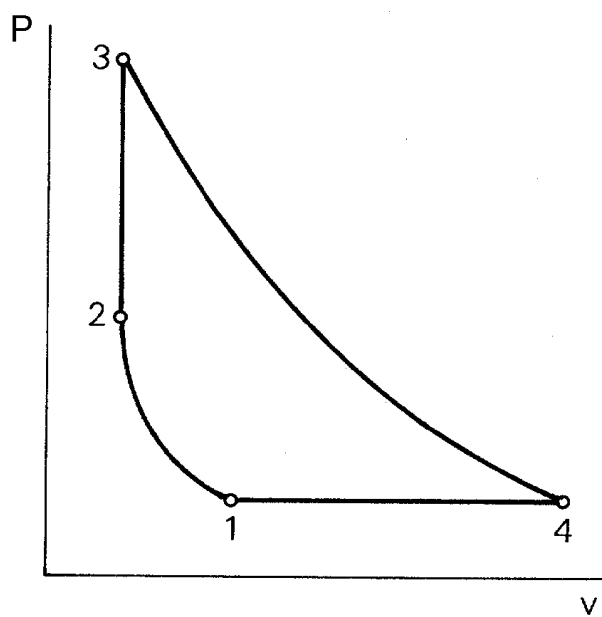
SISTEMI A COMBUSTIONE INTERNA



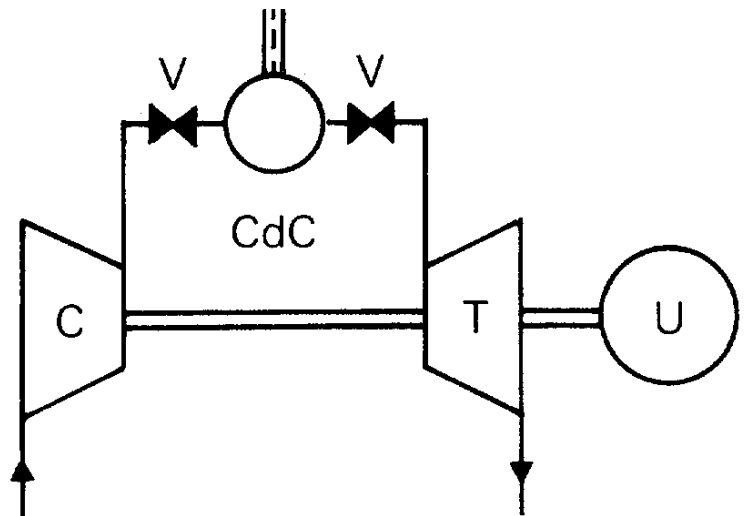
Ciclo Joule (Brayton).



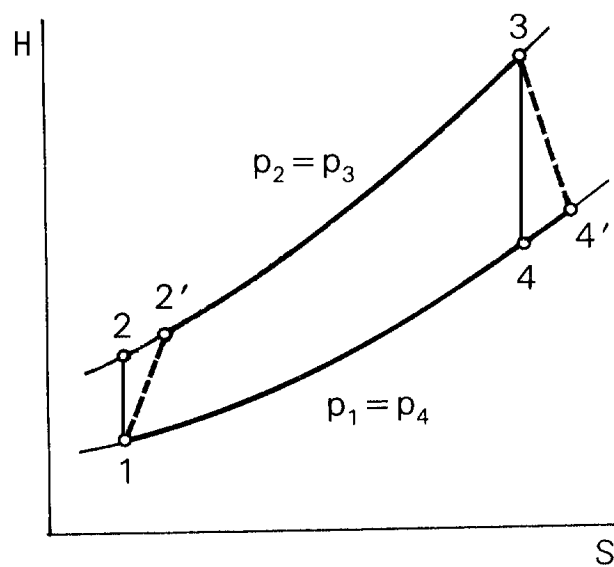
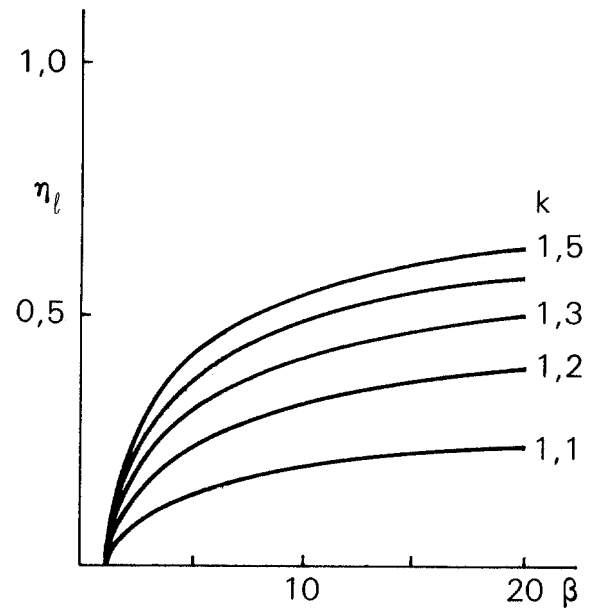
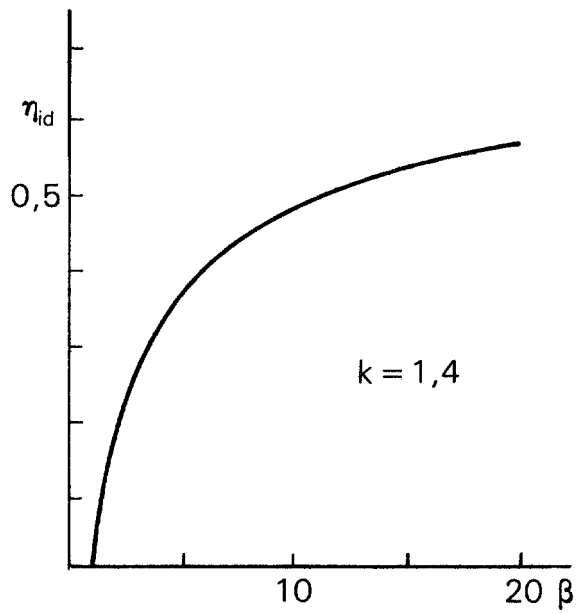
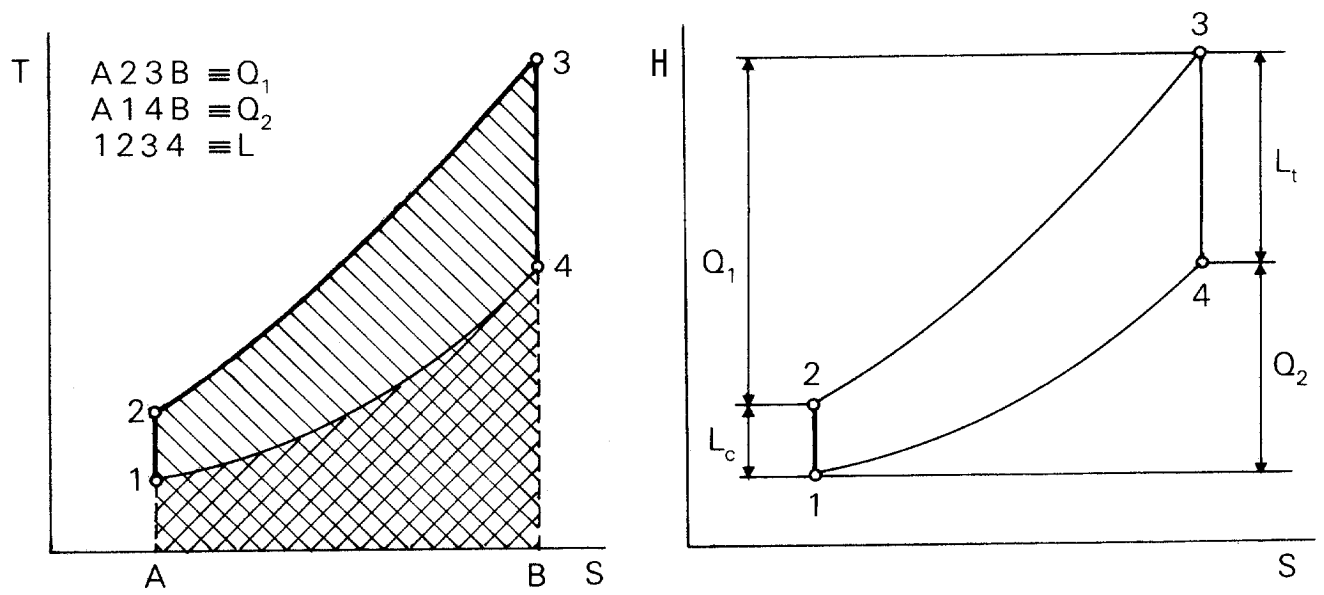
Schema d'impianto in circuito aperto.



Ciclo Holzwarth.



Schema d'impianto in circuito aperto.



TURBOGAS

Turbotecnica

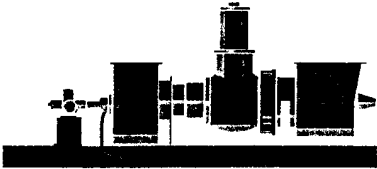
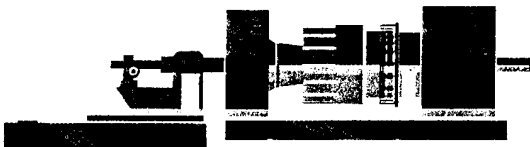
NUOVO PIGNONE GAS TURBINE
FOR ELECTRIC POWER GENERATION
PRODUCT LINE AND PERFORMANCES

TURBINE MODEL		OUTPUT (MW)	HEAT RATE kJ/kWh	EFFICIENCY (%)	PRESSURE RATIO	EXHAUST FLOW RATE (t/h)	EXHAUST TEMPERATURE (°C)	RECOVERABLE HEAT (Gcal/h)
PGT 2	(1)	2	14400	25.0	12.5	36	550	4.3
PGT 5	(1)	5.22	13380	26.9	9.2	88	530	10
PGT 10	(1)	10.14	11660	30.9	14.0	147	480	14.6
PGT 16	(1)	13.39	10230	35.2	21.5	163	495	16.8
PGT 25	(1)	21.91	10155	35.4	17.8	242	512	26
MS 5001 PA	(2)	26.3	12650	28.5	10.5	442	487	45
MS 6001 B	(2)	38.34	11460	31.4	11.8	497	539	58
MS 6001 FA	(2)	70.14	10530	34.2	15.0	705	597	90
MS 7001 EA	(2)	83.5	11050	32.5	12.4	1050	530	117.6
MS 9001 E	(2)	123.4	10650	33.8	12.3	1480	540	166
MS 9001 EC	(2)	169.2	10300	35.0	14.2	1830	558	216
MS 9001 FA	(2)	226.5	10090	35.7	15.0	2200	590	282
LM 2500	(2)	22.33	9970	36.1	18.0	245	531	26
LM 6000	(2)	40.01	9250	38.9	30.0	450	452	40.5

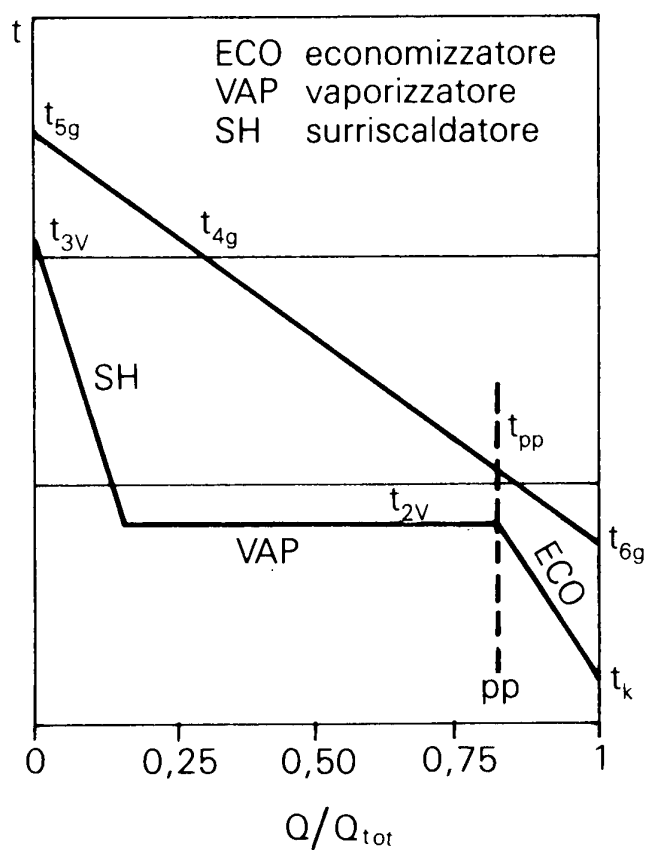
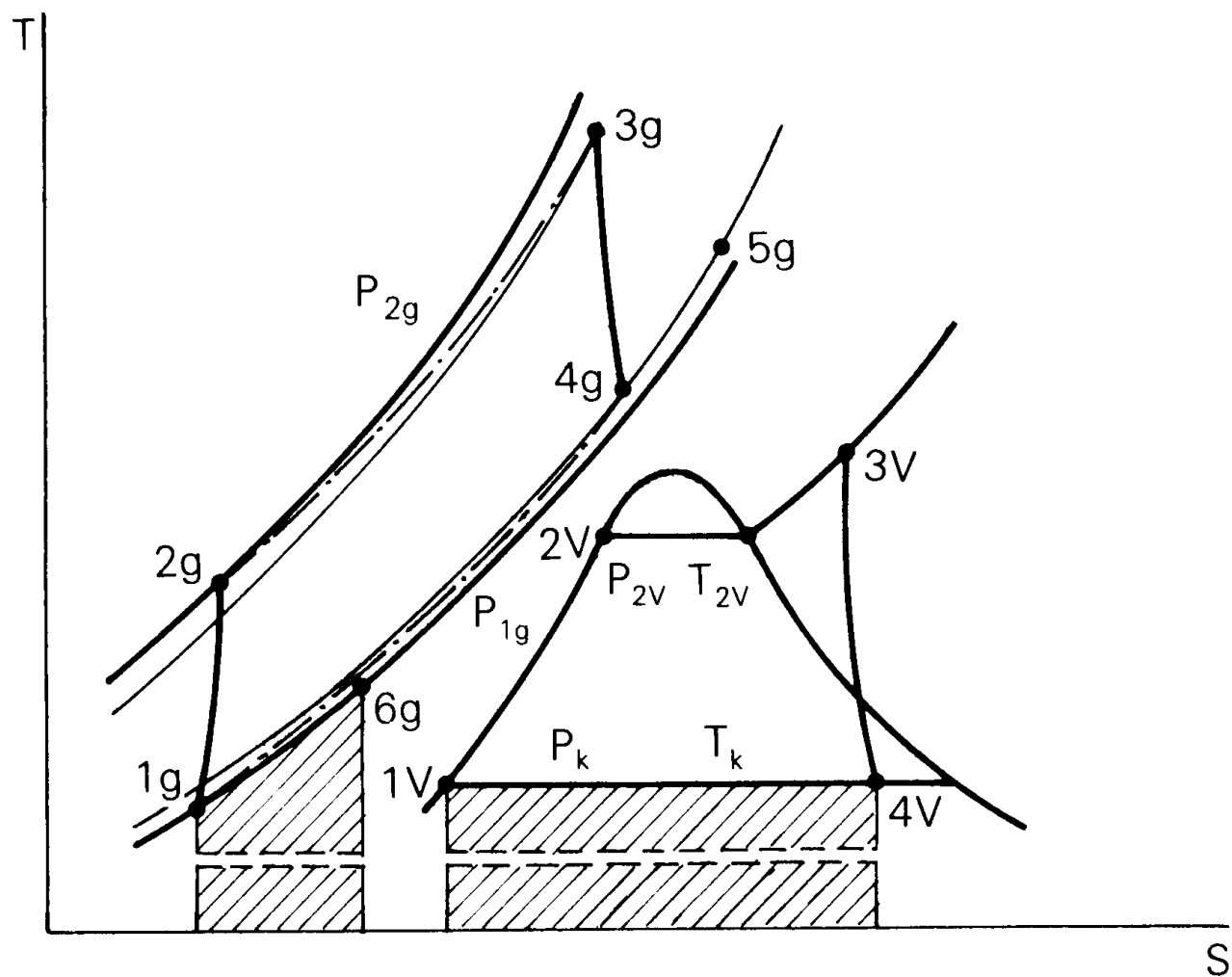
Notes: (1) NUOVO PIGNONE DESIGN
(2) UNDER LICENCE OF GENERAL ELECTRIC CO.

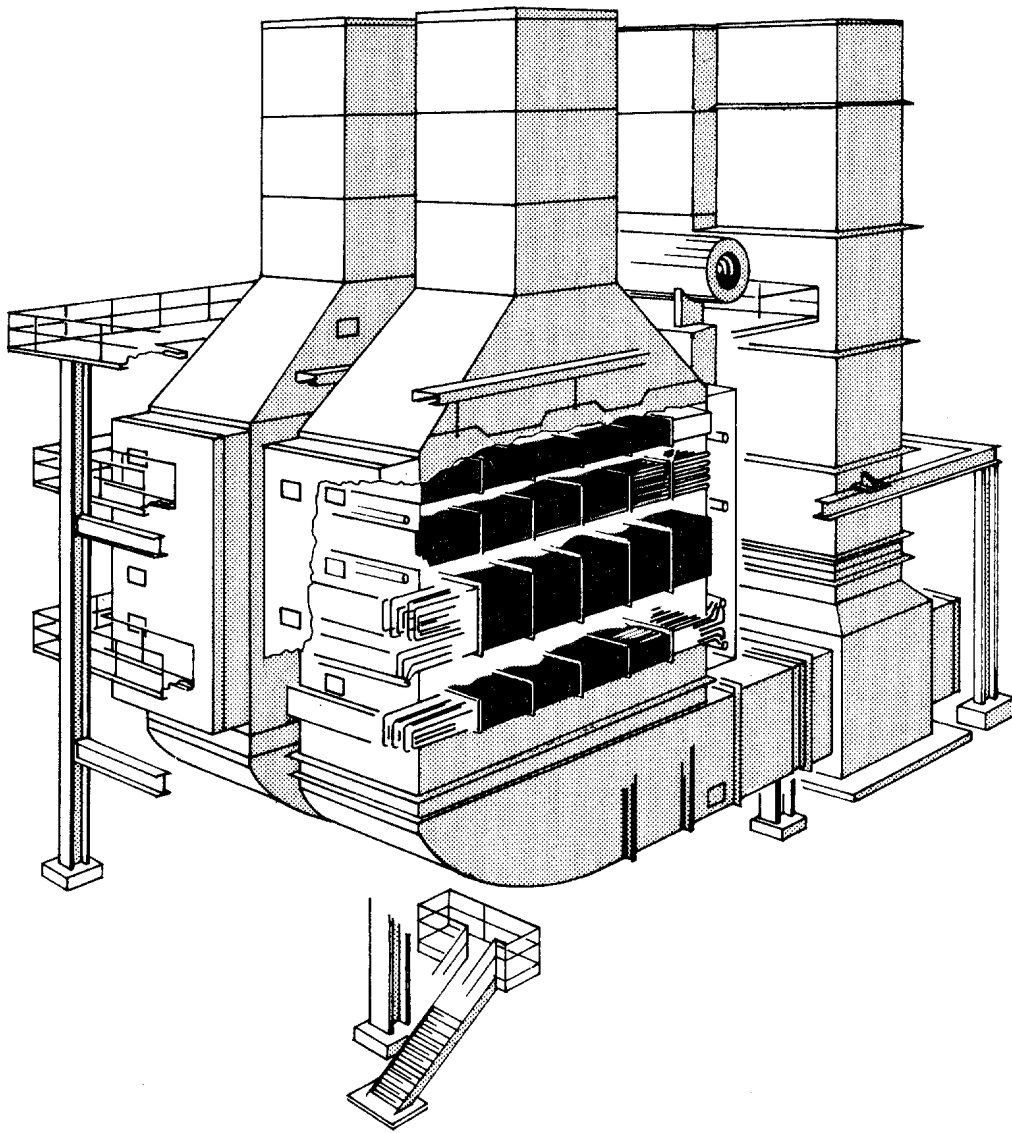
PERFORMANCES REFERRED TO GENERATOR TERMINALS, ISO CONDITIONS, NATURAL GAS FUEL

February 1995

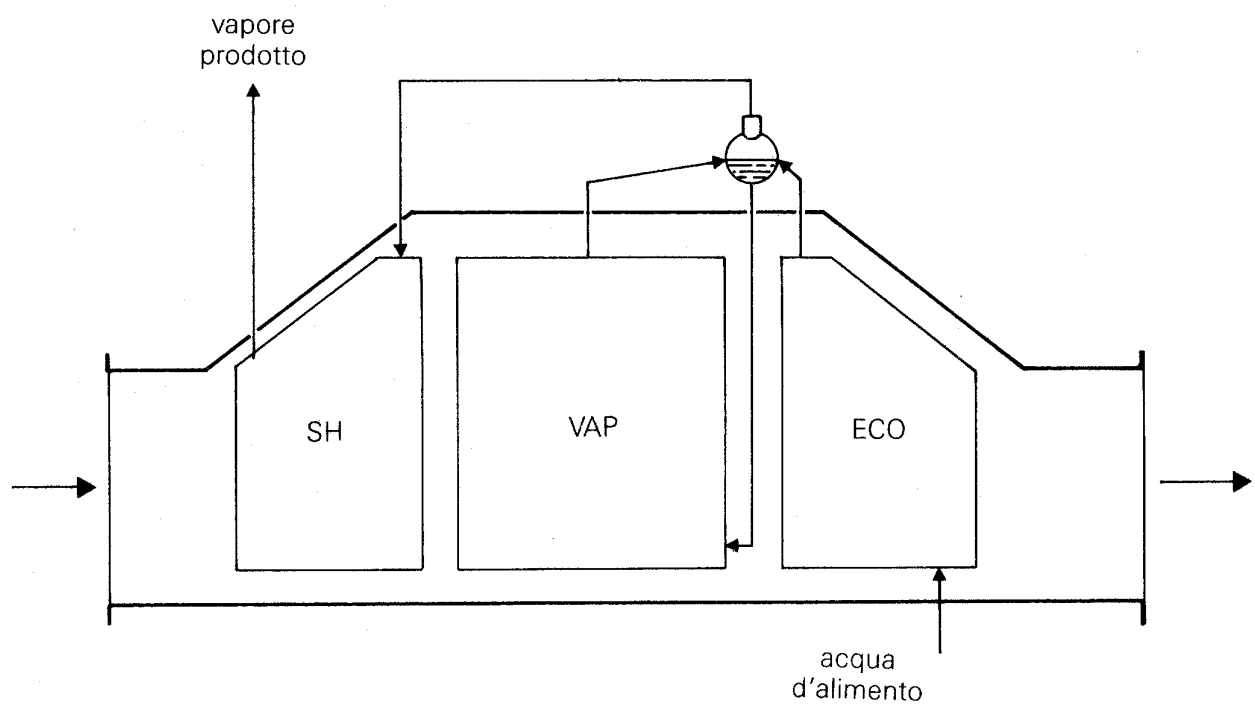
	L 5.5 m W 2.3 m H 2.5 m P 12 t	PGT 2
	L 7.7 m W 2.5 m H 4.3 m P 30 t	PGT 5
	L 8.1 m W 2.5 m H 4.0 m P 27 t	PGT 10
	L 10.7 m W 3.3 m H 3.7 m P 55 t	MS 3002
	L 8.1 m W 2.5 m H 3.8 m P 18 t	PGT 16
	L 8.0 m W 3.0 m H 3.5 m P 27 t	PGT 25 LM 2500
	L 11.64 m W 3.15 m H 3.66 m P 85 t	MS 5001
	L 8.5 m W 3.2 m H 3.6 m P 83 t	MS 5002
	L 7.6 m W 3.2 m H 3.8 m P 85 t	MS 6001
	L 11.6 m W 3.6 m H 3.9 m P 127 t	MS 7001
	L 13.88 m W 4.5 m H 6.29 m P 215 t	MS 9001

SISTEMI COMBINATI GAS/VAPORE

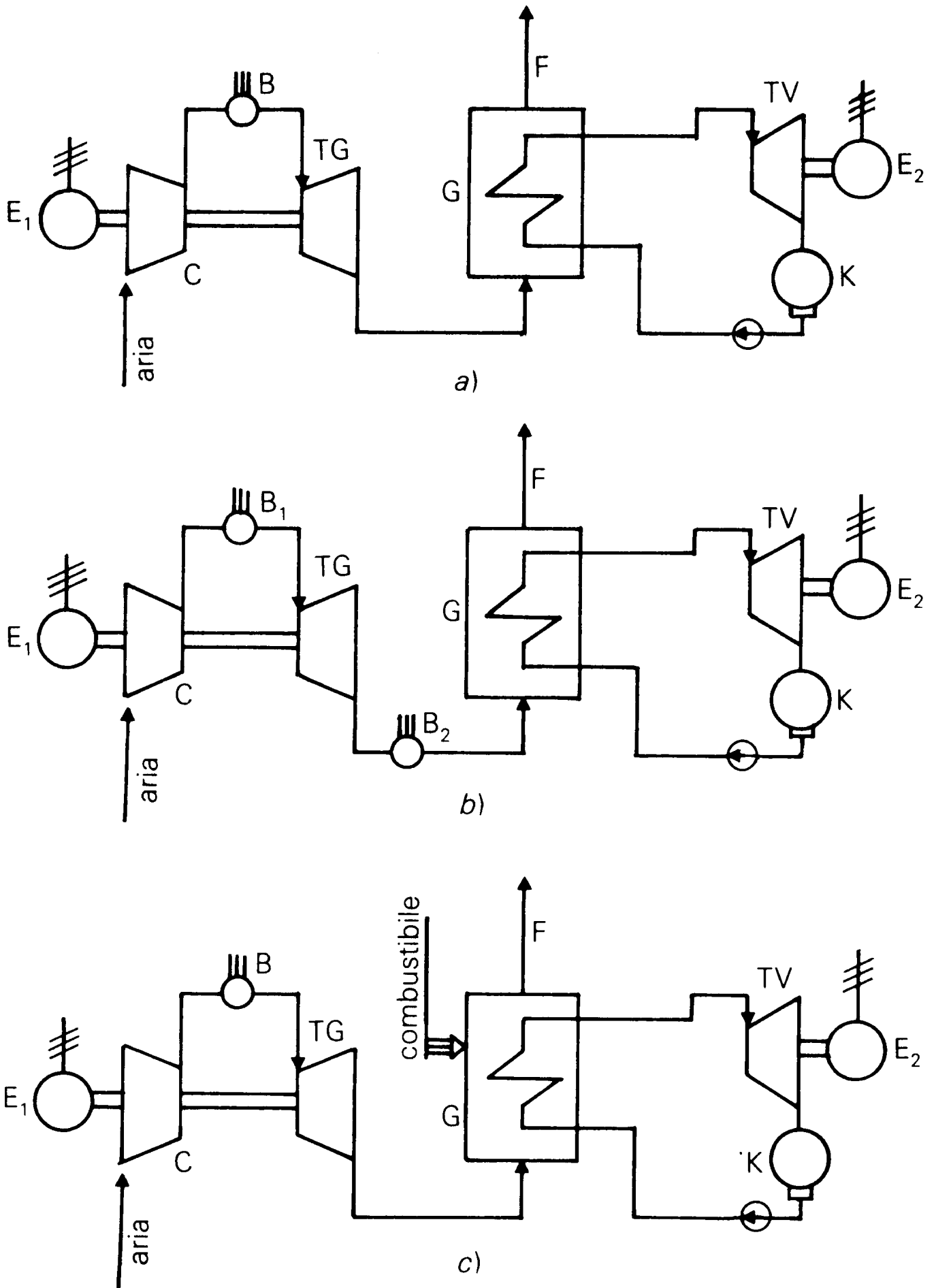




Esempio di lay-out di caldaia a recupero (Nuovo Pignone).



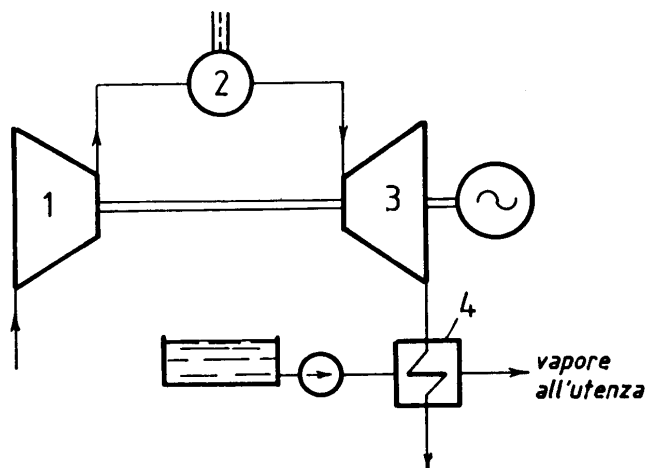
Schema di caldaia a recupero a sviluppo orizzontale.



Schema di impianti combinati gas-vapore.

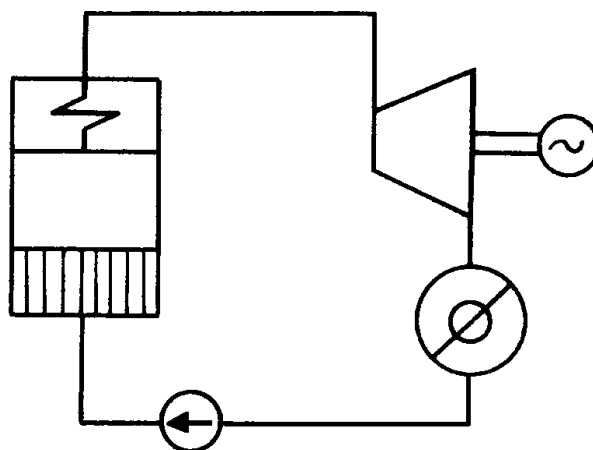
SISTEMI DI COGENERAZIONE (CHP)

SISTEMI CHP CON TURBINA A GAS

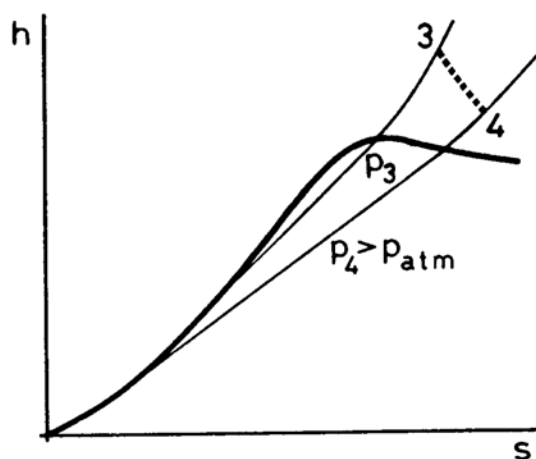


Schema d'impianto di cogenerazione con turbogas e generatore di vapore a recupero.

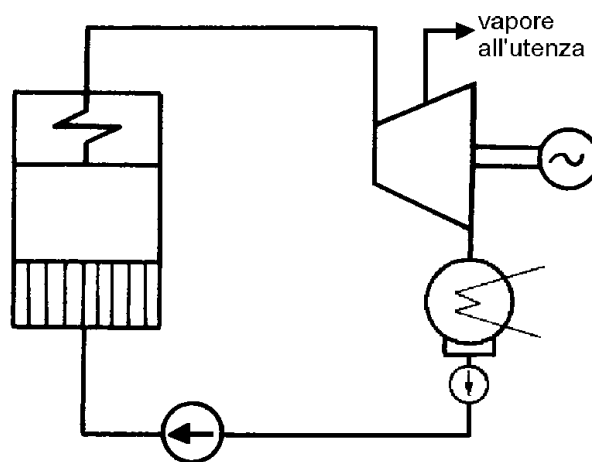
SISTEMI CHP CON TURBINA A VAPORE



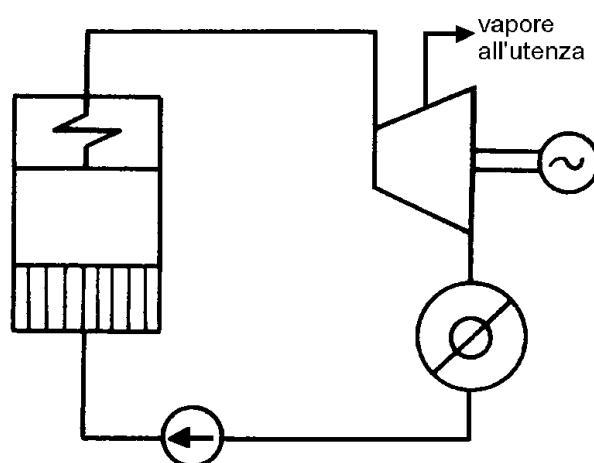
Schema d'impianto a vapore a contropressione.



Trasformazioni che si realizzano in un impianto a vapore a contropressione.

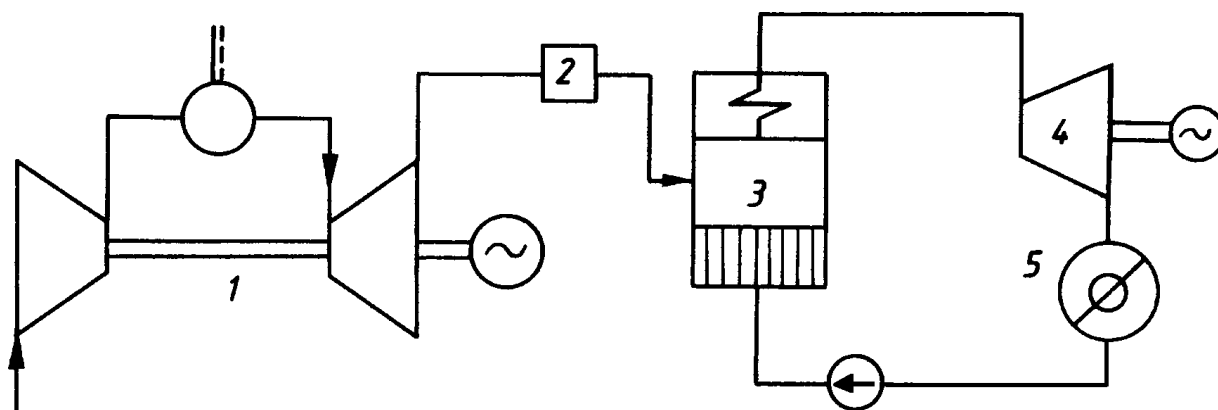


Schema d'impianto a vapore a derivazione e condensazione.



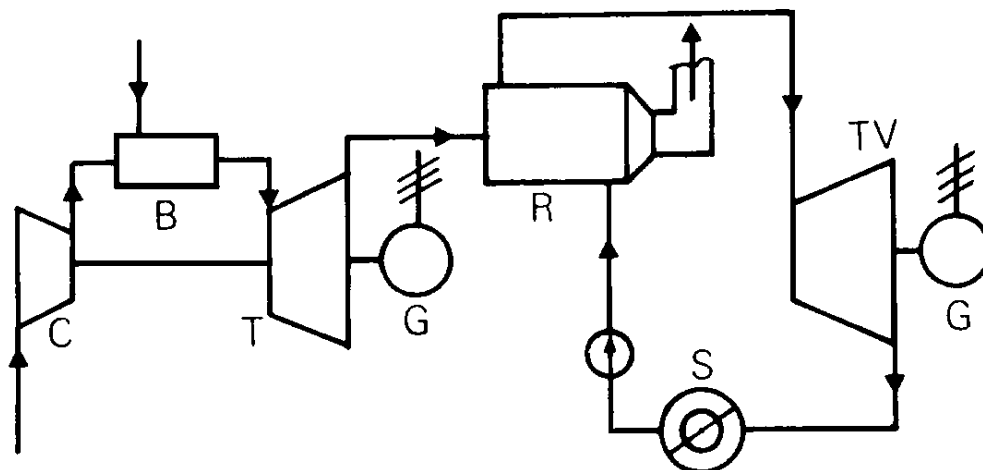
Schema d'impianto a vapore a derivazione e contropressione.

SISTEMI CHP CON IMPIANTO COMBINATO GAS/VAPORE

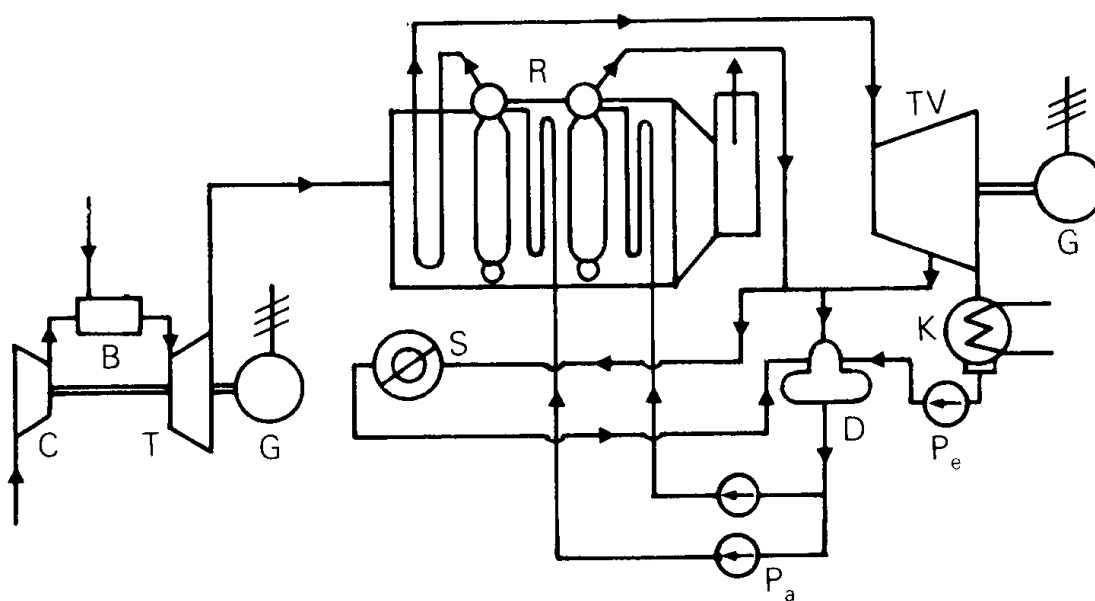


Schema di sistema cogenerativo con impianto combinato gas-vapore.

1. Turbina a gas; 2. Postbruciatore; 3. Caldaia a recupero; 4. Turbina a vapore a contropressione; 5. Utilizzatore vapore.

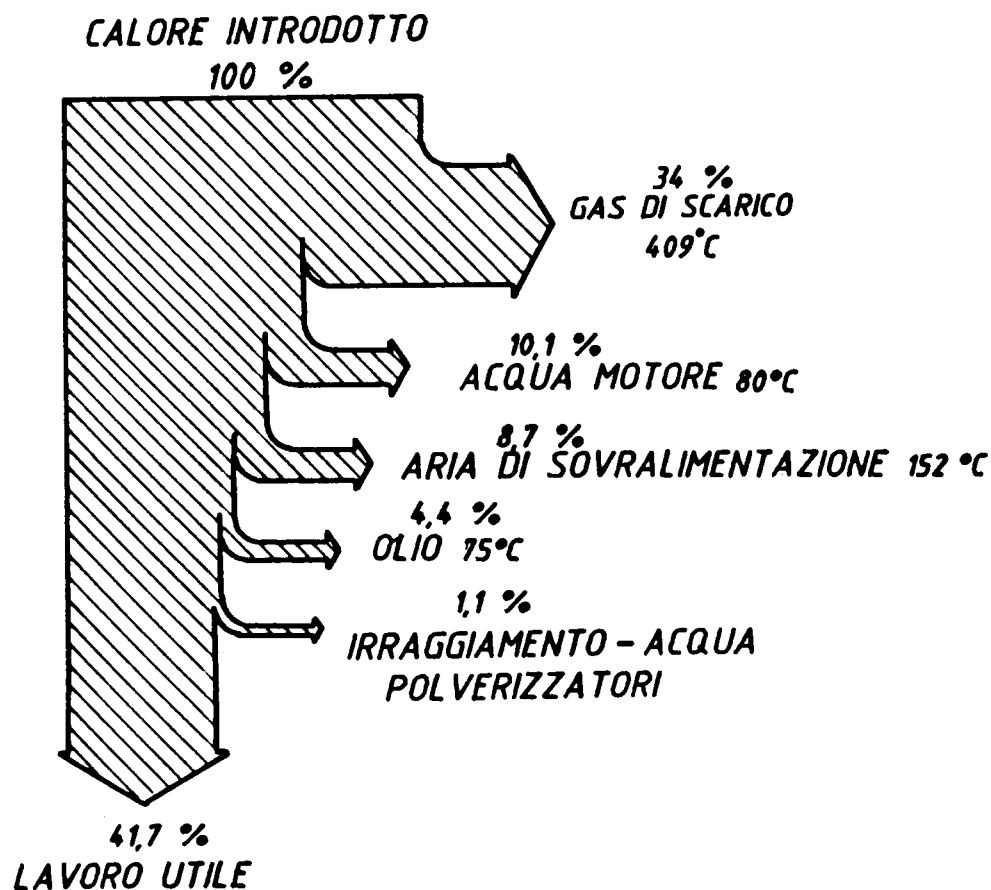


Cogenerazione con sistema combinato gas/vapore (unfired) con turbina a vapore a contropressione

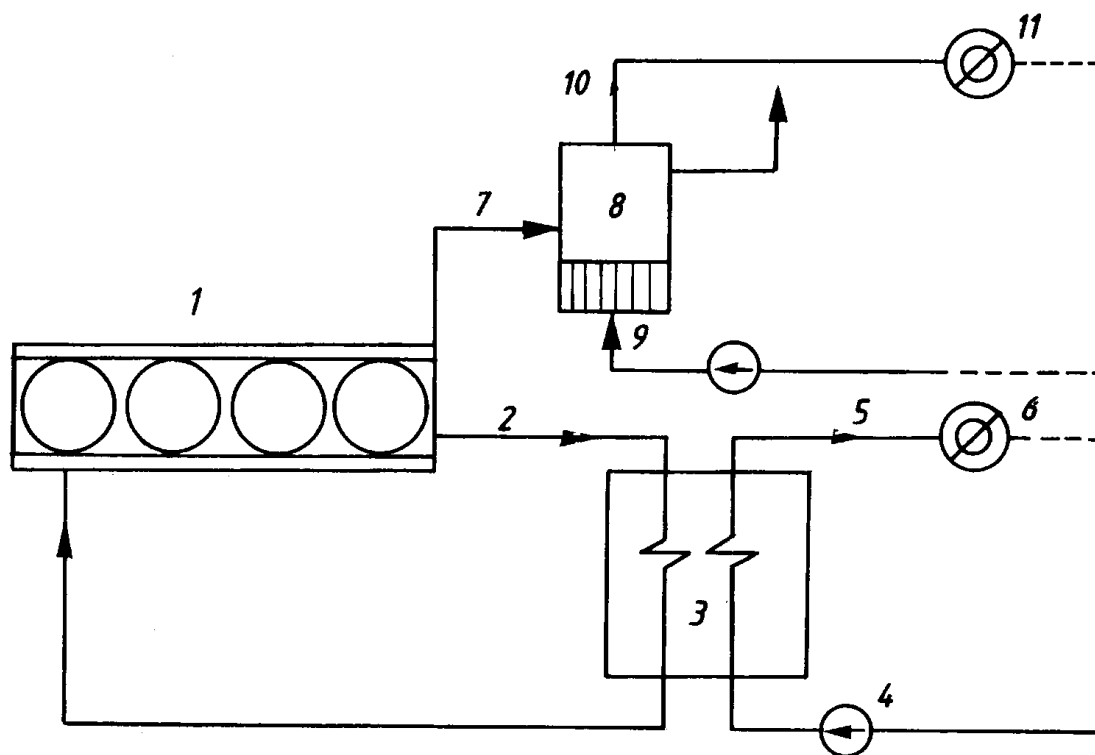


Cogenerazione con sistema combinato gas/vapore con turbina a vapore a derivazione e condensazione

SISTEMI CHP CON MOTORE ALTERNATIVO A C.I.



Bilancio termico a pieno carico di un motore diesel sovralimentato a quattro tempi medio-veloce.



Schema di impianto di cogenerazione con motore alternativo a c.i.

1. Motore; 2. Liquido refrigerante del motore; 3. Scambiatore di calore; 4. Ingresso acqua fredda; 5. Uscita acqua calda; 6. Utilizzatore acqua calda; 7. Gas combusti; 8. Caldaia a recupero; 9. Ingresso acqua; 10. Uscita vapore; 11. Utilizzatore vapore.

INDICE

Frontespizio	1
Sistema motore a vapore.....	2
Centrale termoelettrica a vapore.....	8
Combustibili industriali	9
Motori volumetrici a combustione interna	11
Motori dinamici a gas	16
Turbogas	19
Sistemi combinati gas/vapore	21
Sistemi di cogenerazione (CHP).....	24
Indice	28