



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PISA  
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

## **4. Sistemi Termici Motori**

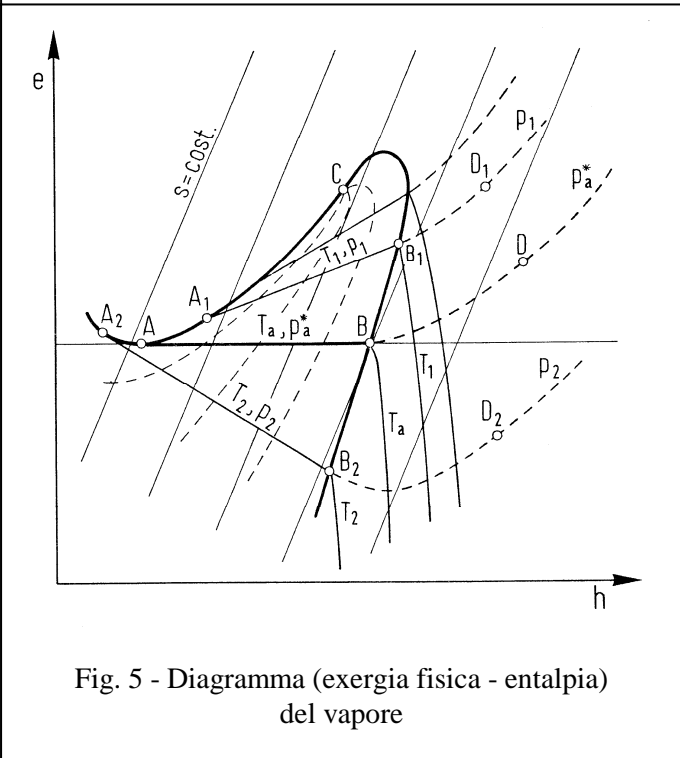
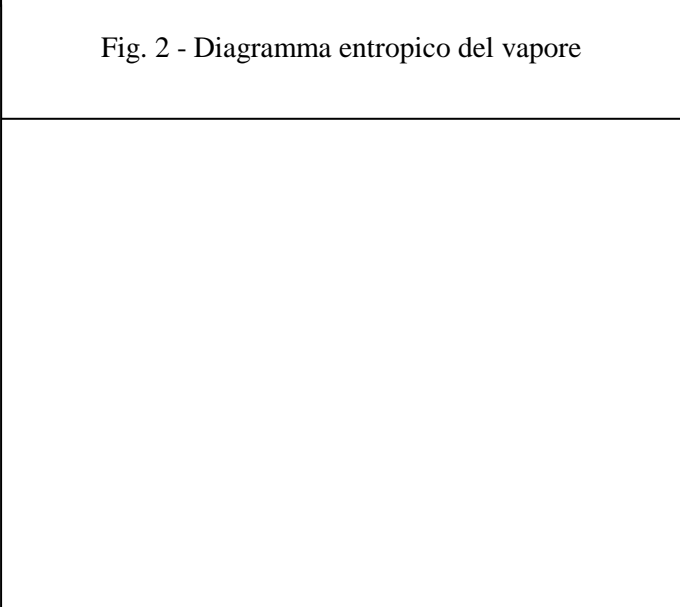
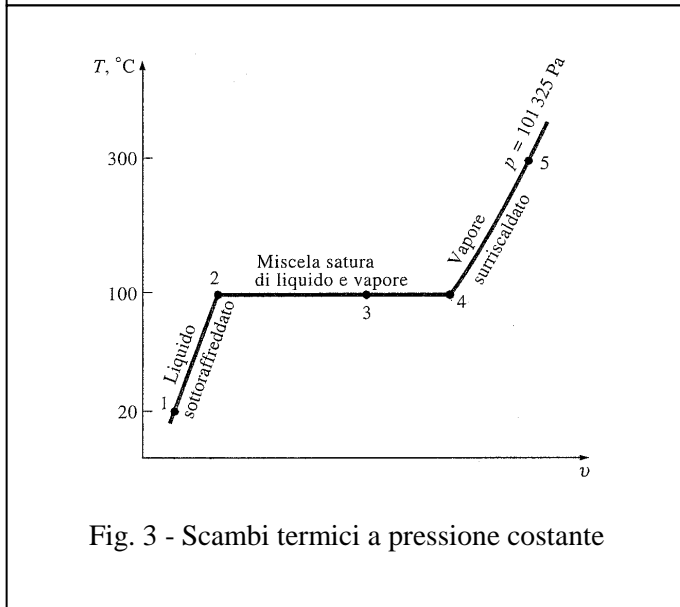
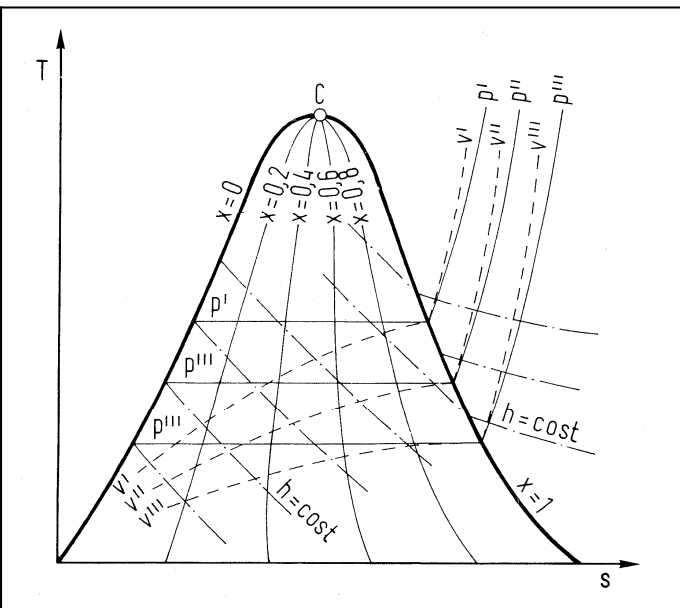
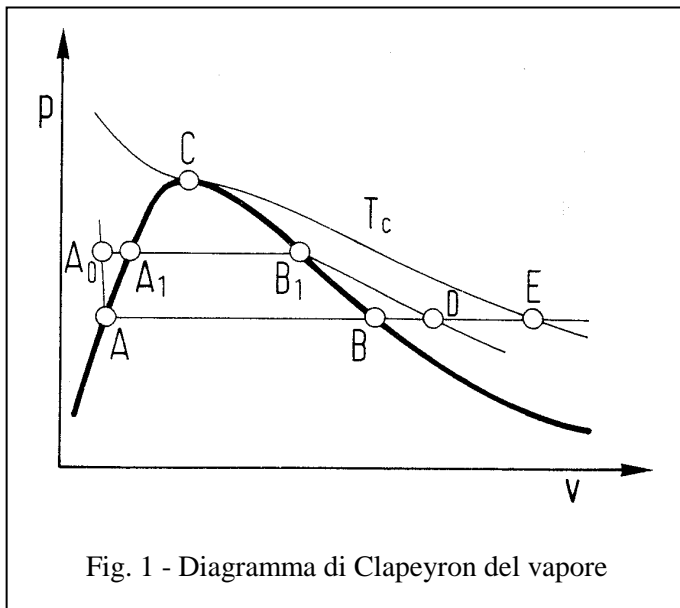
### **4.1. Sistemi Motori a Vapore**

**Roberto Lensi**

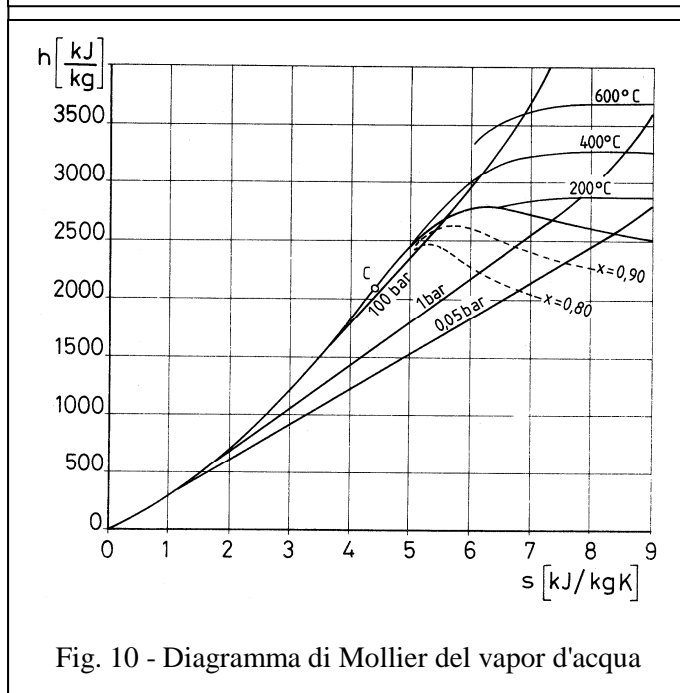
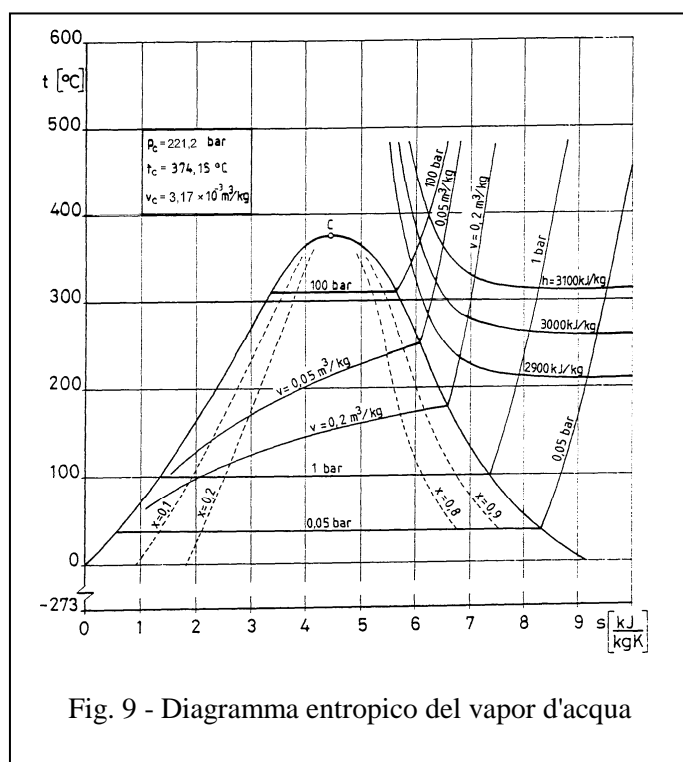
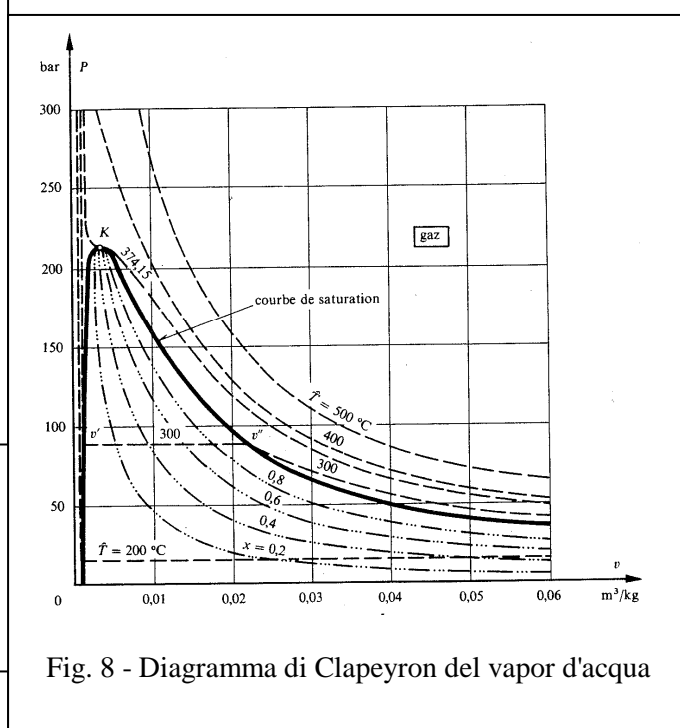
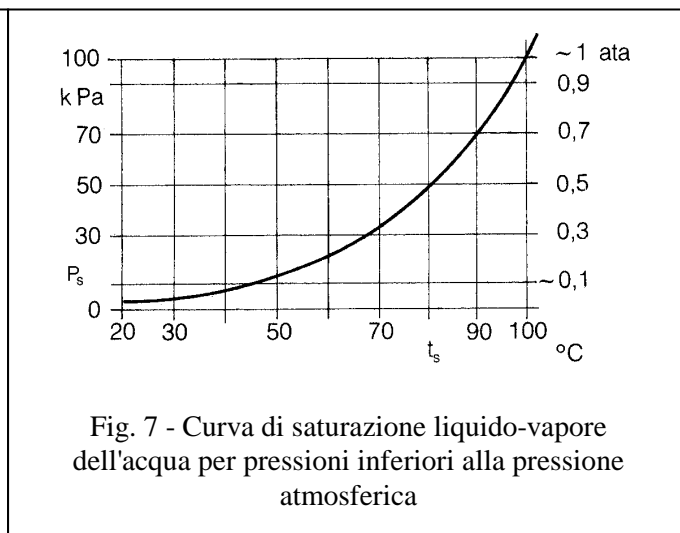
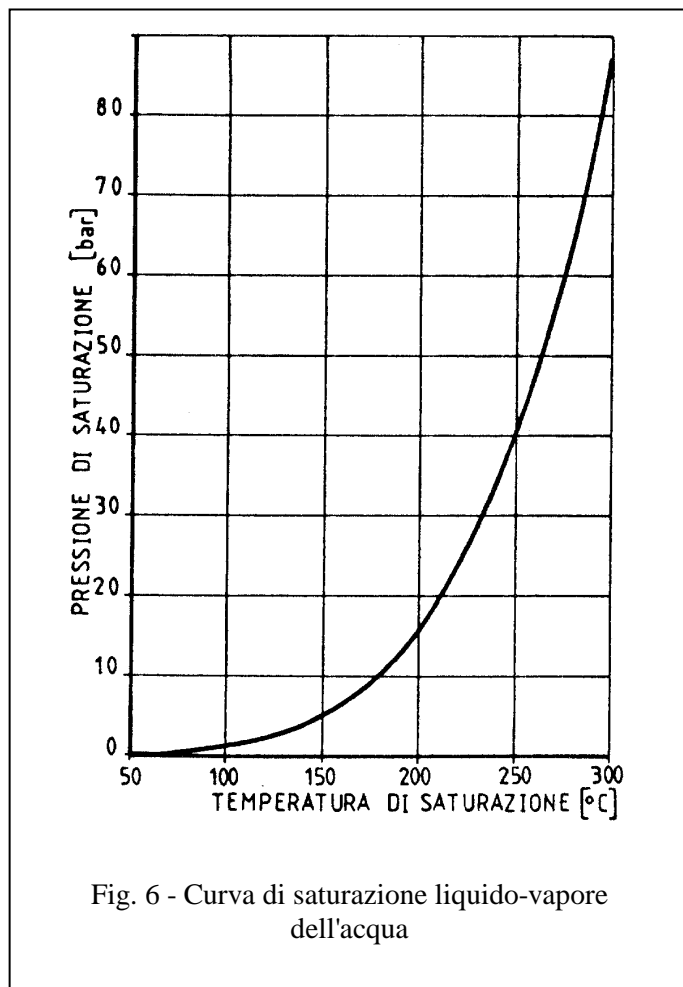
DIPARTIMENTO DI ENERGETICA

Anno Accademico 2010-2011

VAPORE SATURO



VAPORE D'ACQUA SATURO



$t$ [°C]	$P$ [bar]	$v_l$ [m <sup>3</sup> /kg]	$v_v$ [m <sup>3</sup> /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]	$v_l$ [m <sup>3</sup> /kg]	$v_v$ [m <sup>3</sup> /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 <sup>3</sup> /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)

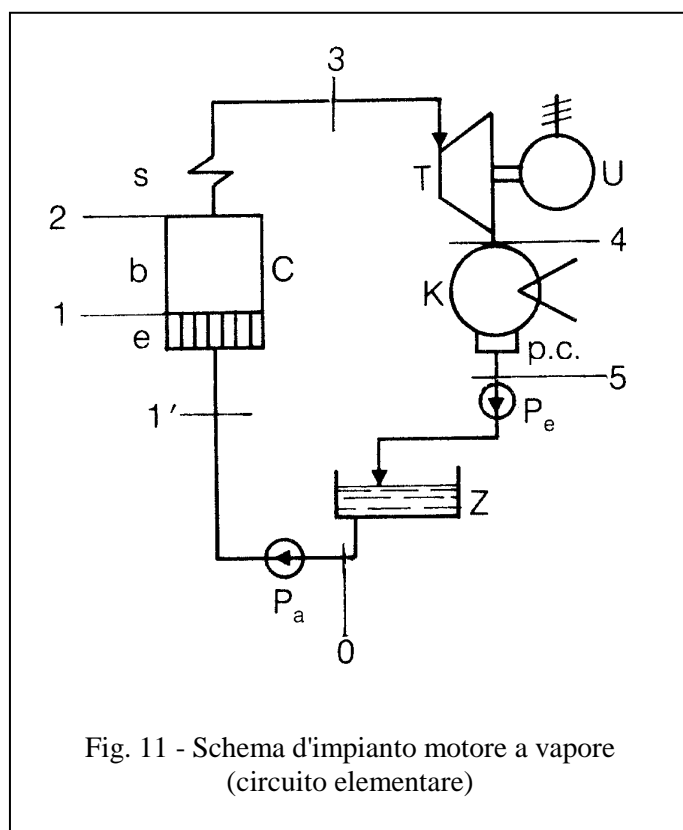
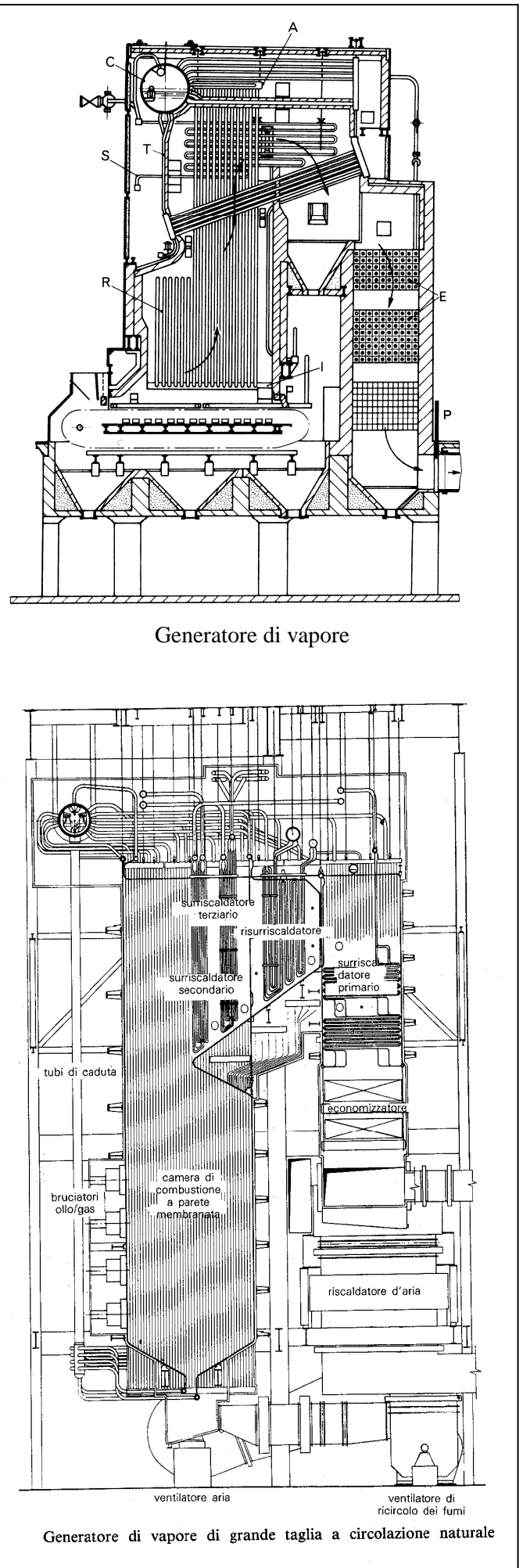
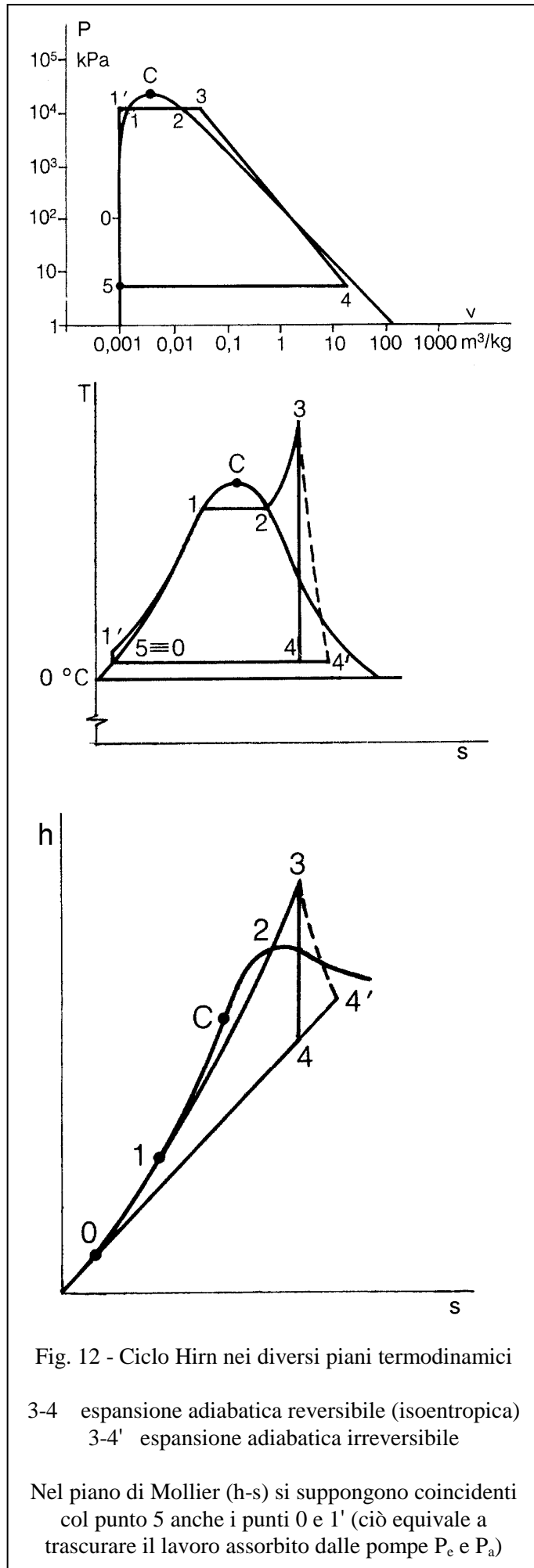
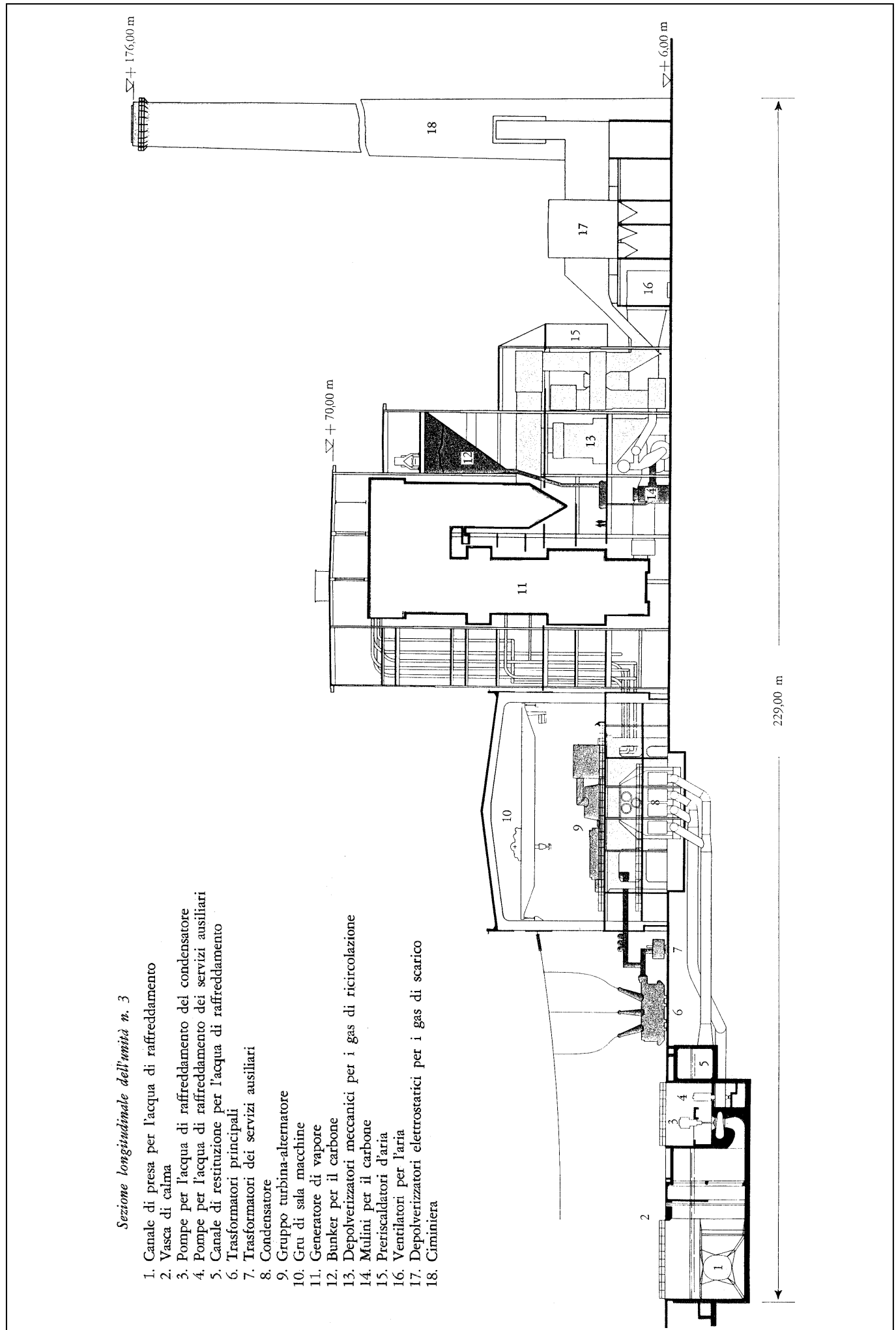


Fig. 11 - Schema d'impianto motore a vapore (circuito elementare)

Legenda	
C	Caldaia (Generatore di vapore)
e	Economizzatore (riscaldamento acqua)
b	Boiler (evaporazione acqua)
s	Surriscaldatore (surriscaldamento vapore)
T	Turbina a vapore
U	Utilizzatore d'energia meccanica (alternatore)
K	Condensatore del vapore
p.c.	Pozzo caldo del condensatore
Pe	Pompa di estrazione del condensato
Z	Serbatoio d'acqua (fittiziamente aperto)
Pa	Pompa di alimentazione acqua in caldaia





RISURRISCALDAMENTO DEL VAPORE

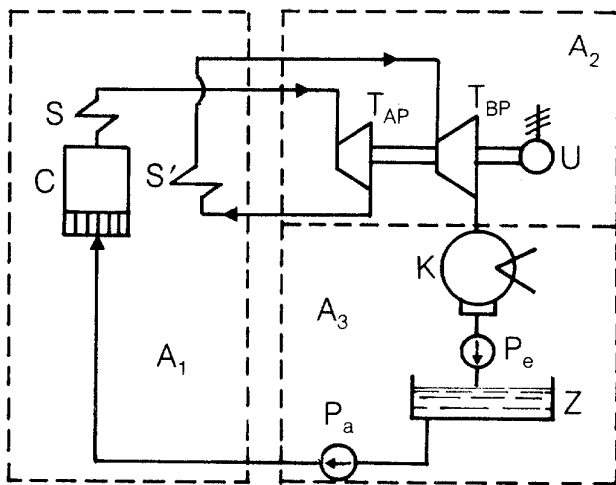


Fig. 13 - Schema d'impianto motore a vapore con risurriscaldamento

Legenda	
A <sub>1</sub>	Regione: generatore di vapore
C	Caldaia (Generatore di vapore)
S	Surriscaldatore (surriscaldamento vapore)
S'	Risurriscaldatore del vapore
A <sub>2</sub>	Regione: sala macchine
T <sub>AP</sub>	Turbina a vapore di Alta Pressione
T <sub>BP</sub>	Turbina a vapore di Bassa Pressione
U	Utilizzatore energia meccanica (alternatore)
A <sub>3</sub>	Regione: condensatore e pompe
K	Condensatore del vapore
Pe	Pompa di estrazione del condensato
Z	Serbatoio d'acqua (fittiziamente aperto)
Pa	Pompa di alimentazione acqua in caldaia

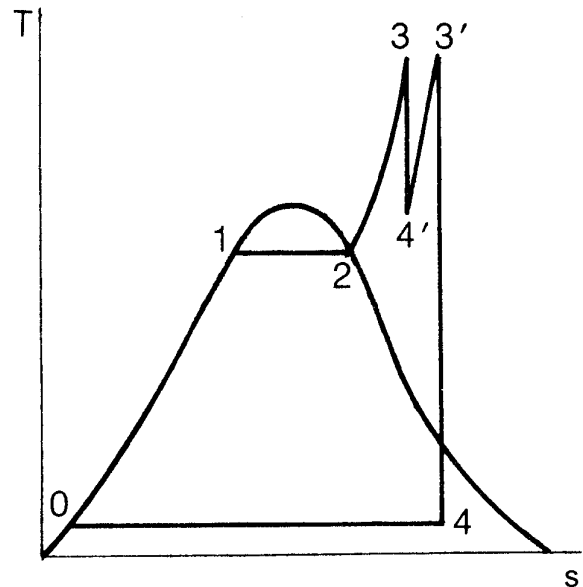


Fig. 14 - Ciclo Hirn con risurriscaldamento

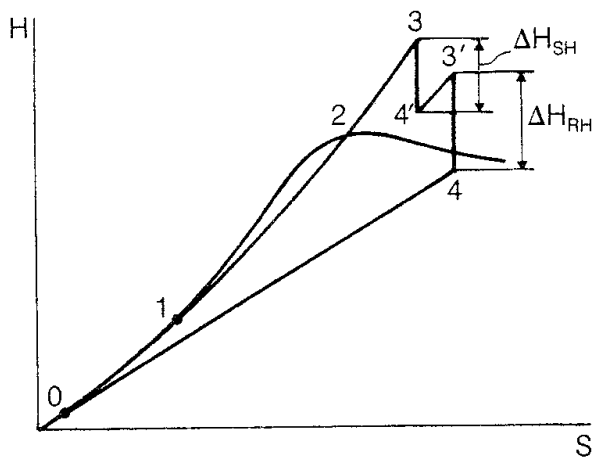


Fig. 15 - Ciclo Hirn con risurriscaldamento

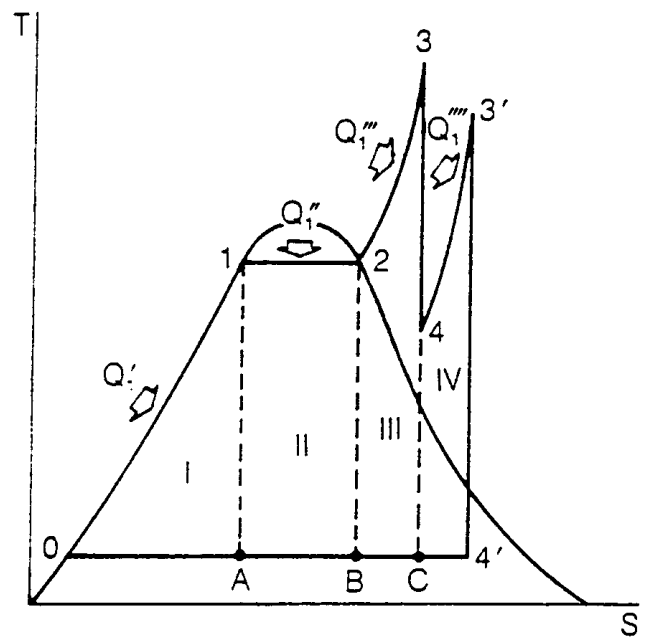


Fig. 16 - Ciclo Hirn scomposto in cicli parziali



SPILLAMENTI DI VAPORE

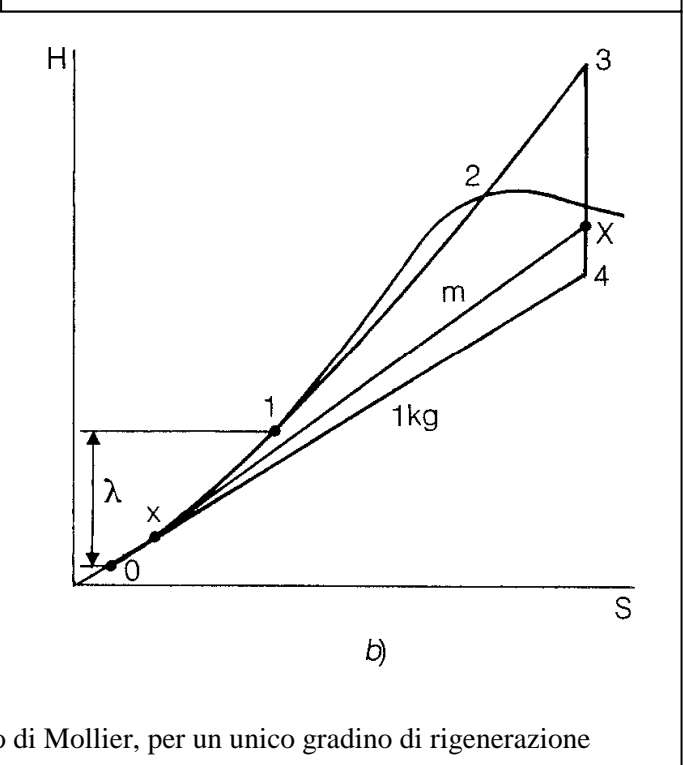
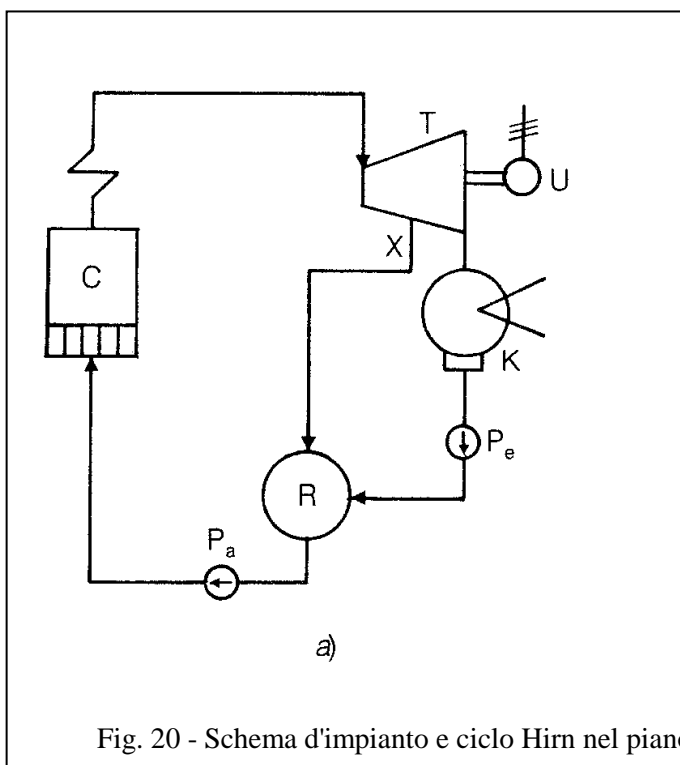
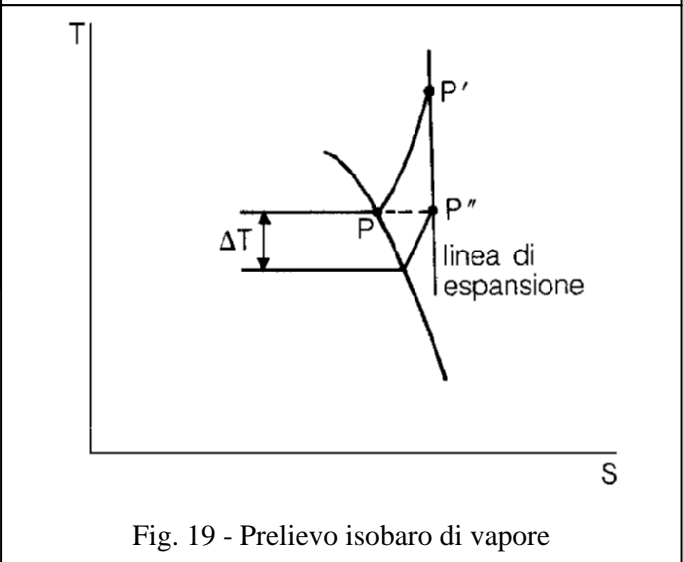
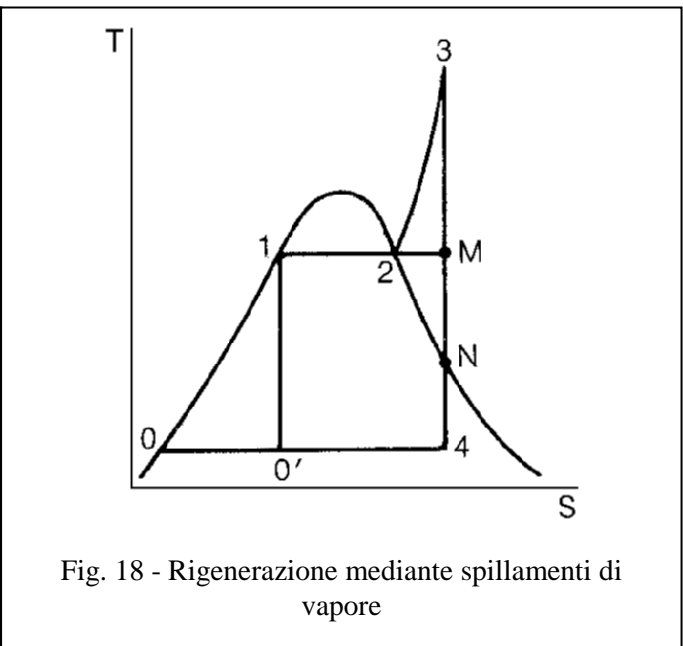
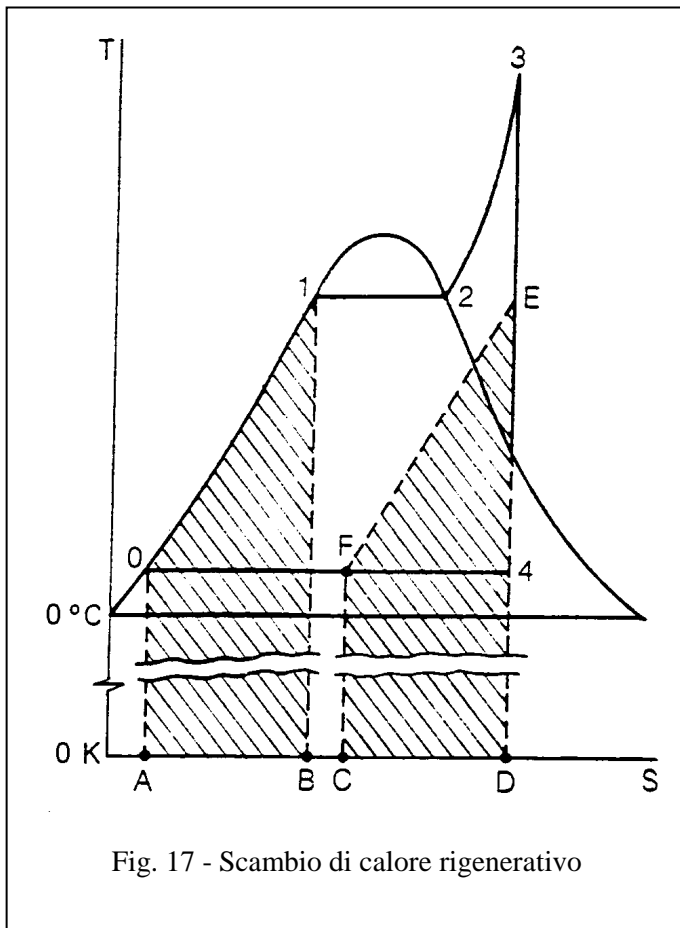


Fig. 20 - Schema d'impianto e ciclo Hirn nel piano di Mollier, per un unico gradino di rigenerazione

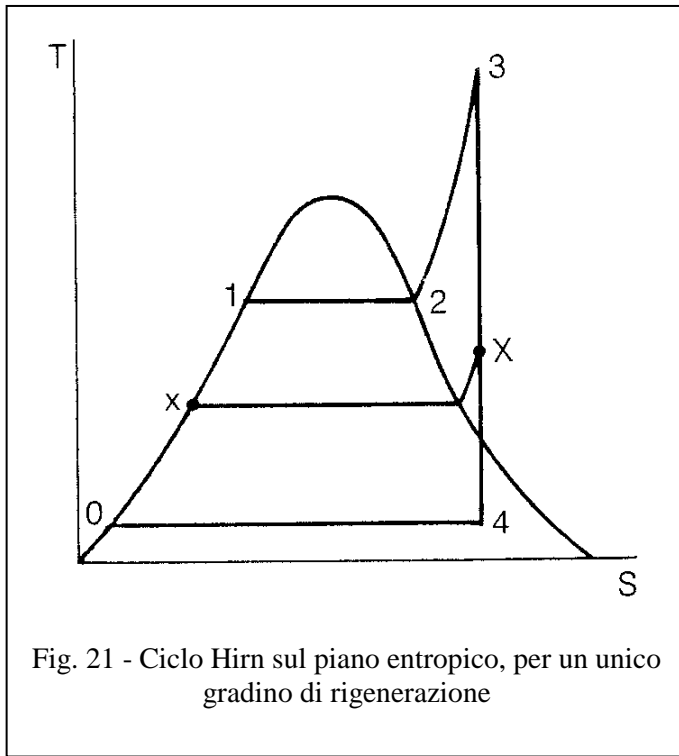


Fig. 21 - Ciclo Hirn sul piano entropico, per un unico gradino di rigenerazione

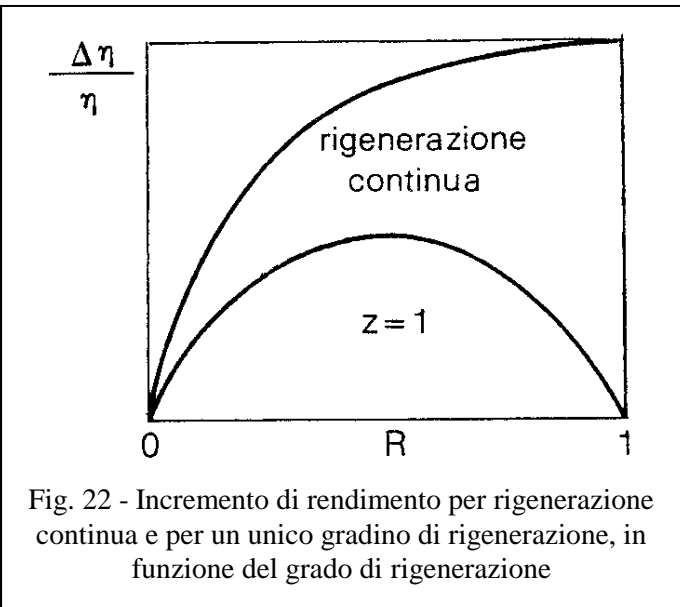


Fig. 22 - Incremento di rendimento per rigenerazione continua e per un unico gradino di rigenerazione, in funzione del grado di rigenerazione

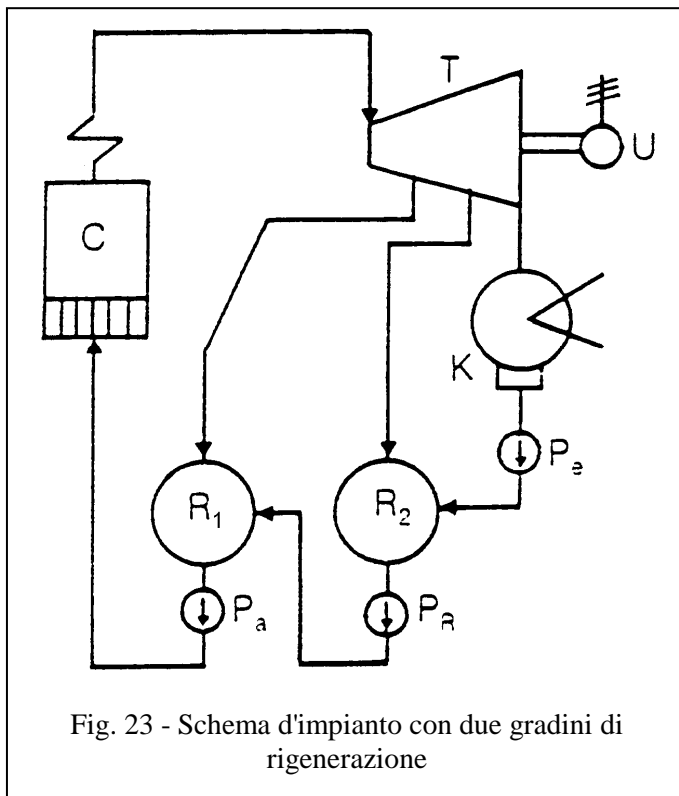


Fig. 23 - Schema d'impianto con due gradini di rigenerazione

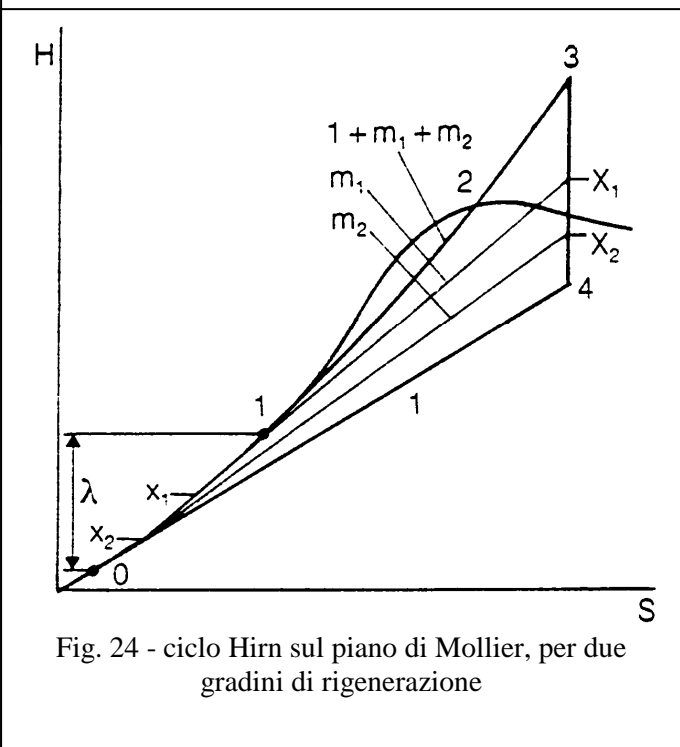


Fig. 24 - ciclo Hirn sul piano di Mollier, per due gradini di rigenerazione

Grado di rigenerazione:

$$R = (h_x - h_0) / (h_1 - h_0)$$

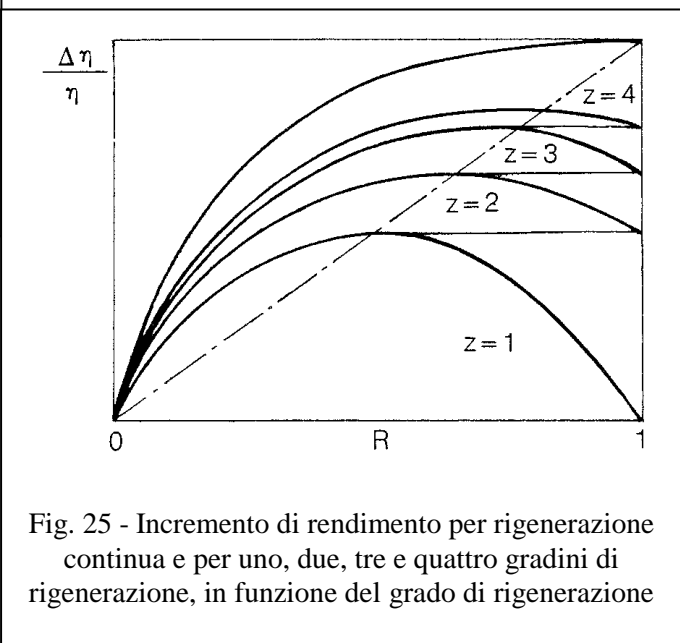


Fig. 25 - Incremento di rendimento per rigenerazione continua e per uno, due, tre e quattro gradini di rigenerazione, in funzione del grado di rigenerazione

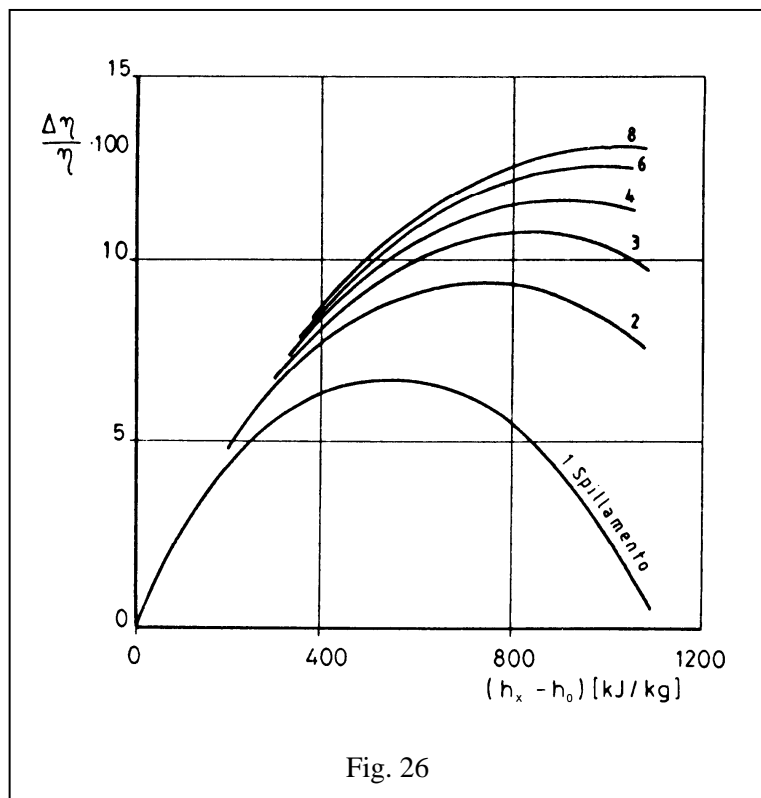
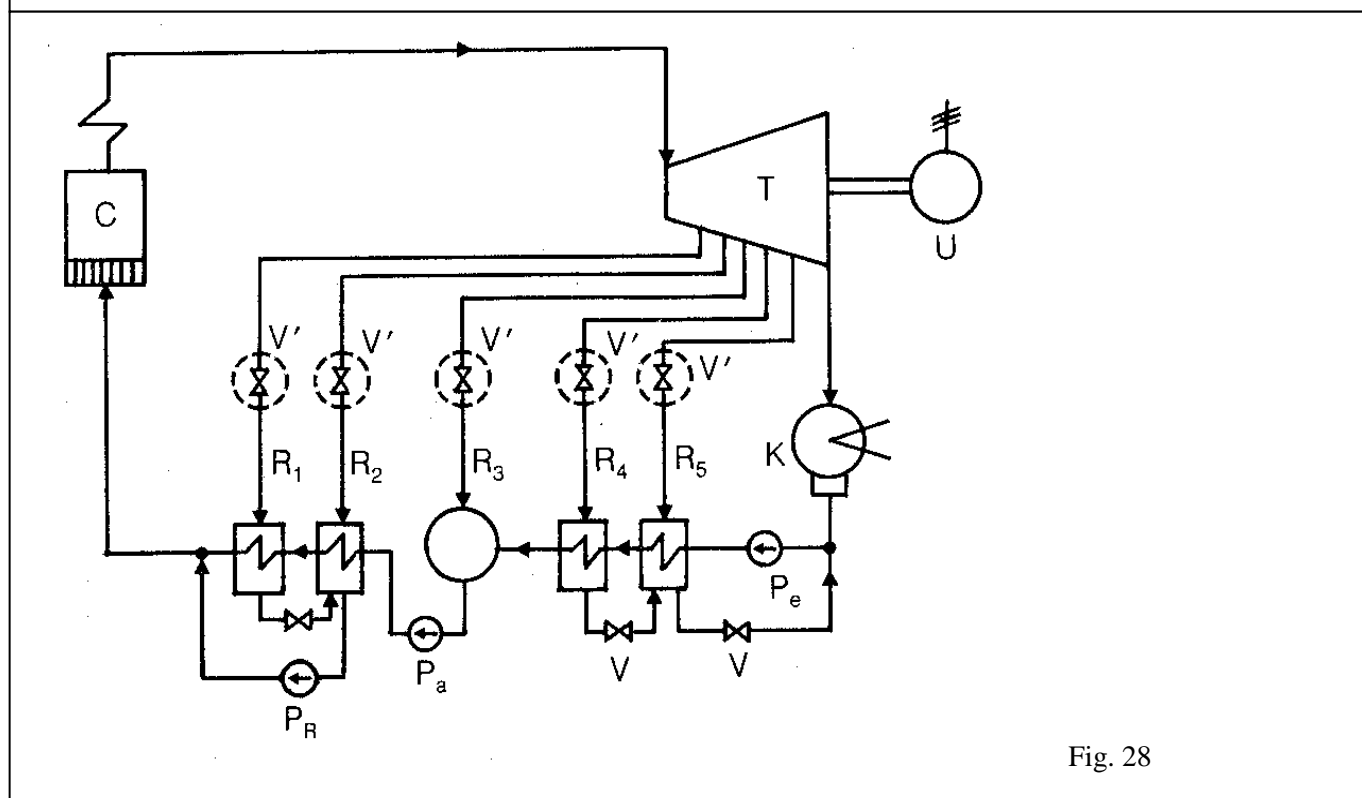
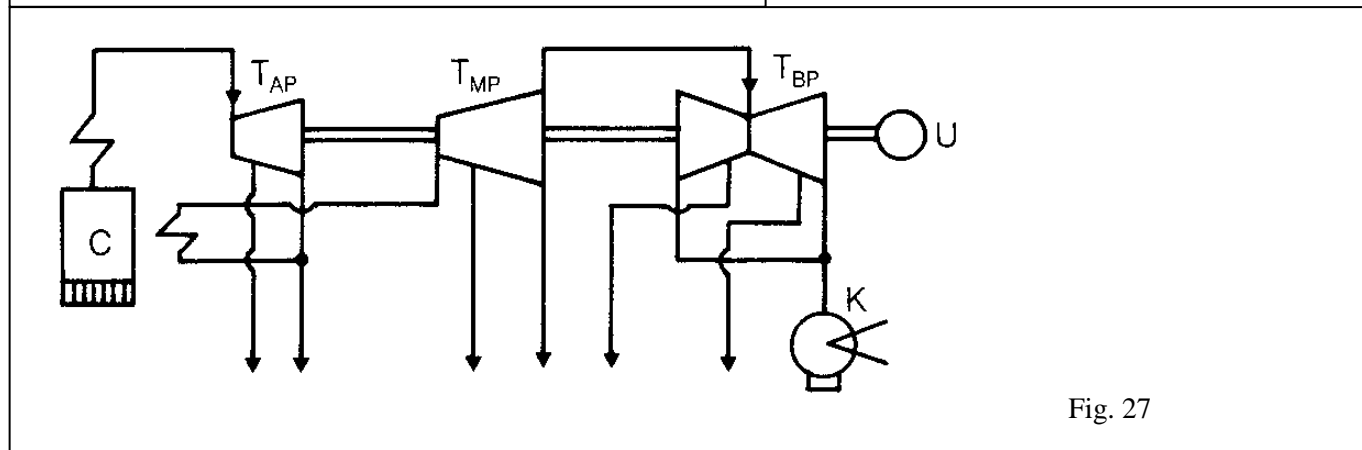


Fig. 26 - Incremento percentuale di rendimento in funzione del calore fornito all'acqua di alimento mediante rigenerazione

Fig. 27 - Schema d'impianto motore a vapore con risurriscaldamento del vapore e 6 spillamenti rigenerativi

Fig. 28 - Schema d'impianto motore a vapore con 4 scambiatori rigenerativi a superficie, due di alta pressione (R<sub>1</sub> e R<sub>2</sub>) e due di bassa pressione (R<sub>4</sub> e R<sub>5</sub>), ed 1 rigeneratore a miscelazione (R<sub>3</sub>) a pressione intermedia con funzione di degasatore e di serbatoio di accumulo



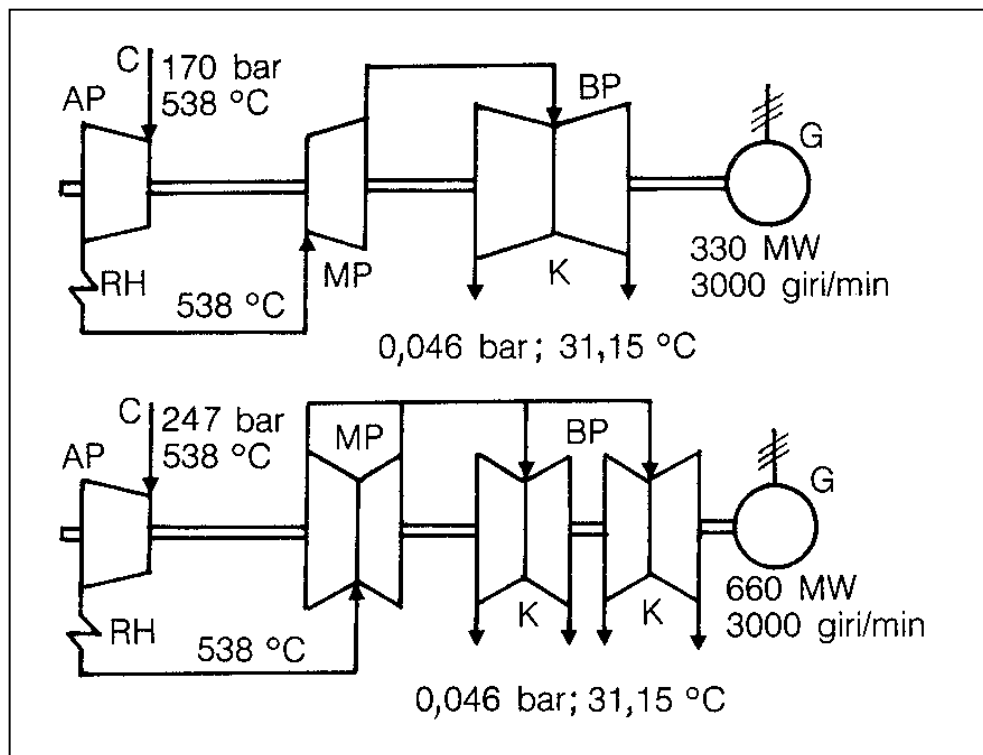


Fig. 29 - Gruppi a vapore unificati Enel (sottocritici e sovra-critici)

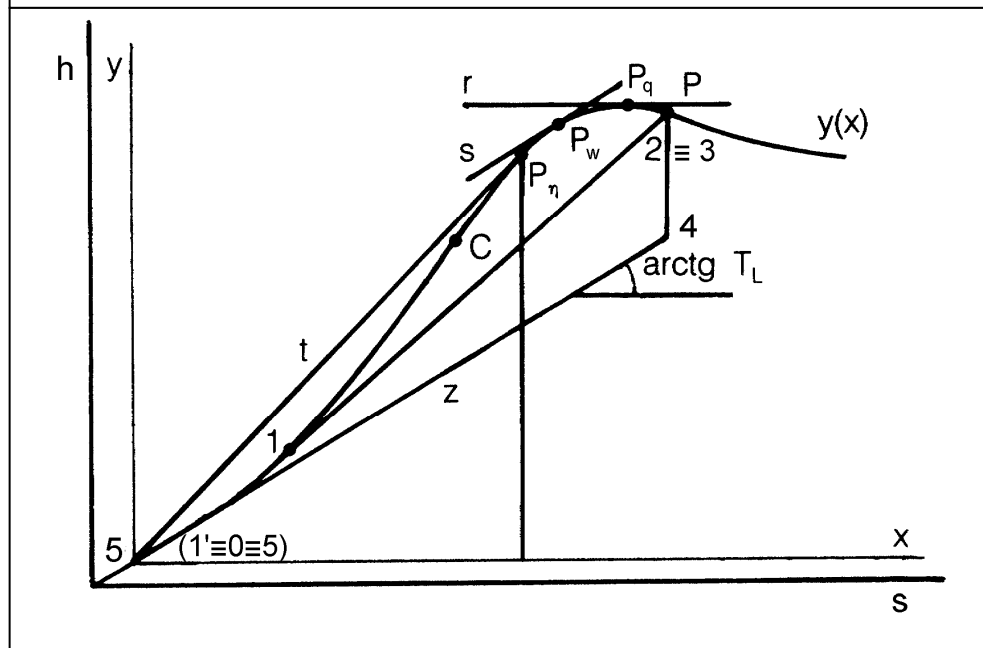


Fig. 30 - Determinazione della pressione massima ottimale per un ciclo Rankine

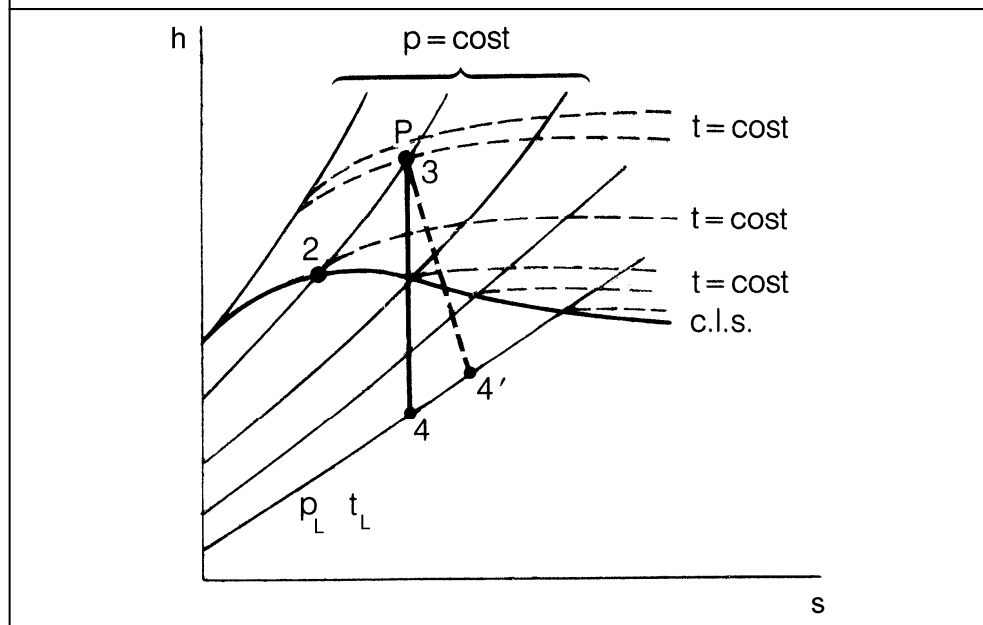
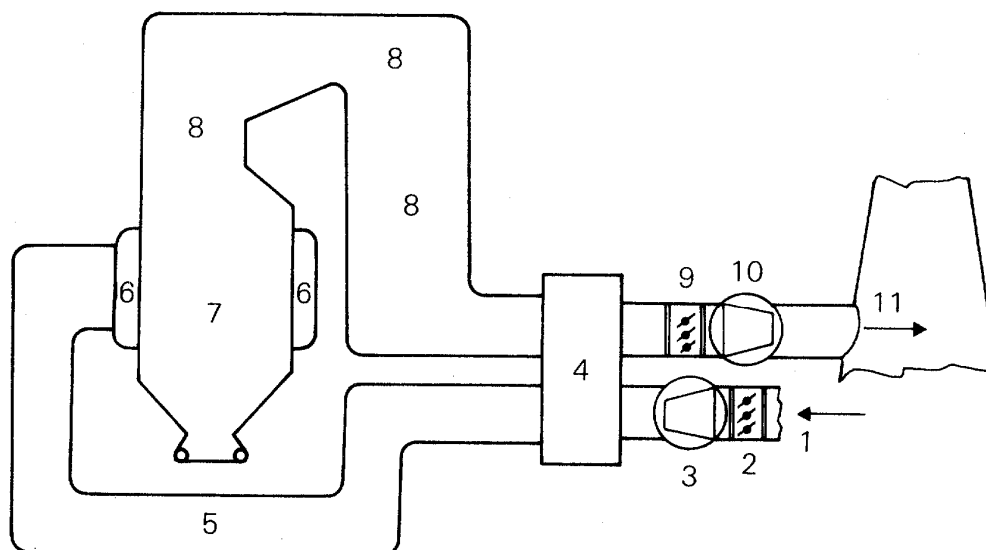


Fig. 31 - Determinazione della pressione massima ottimale per un ciclo Hirn

## GENERATORI DI VAPORE



- 1-6 percorso aria  
 1 - aspirazione aria ambiente  
 2 - serrande di regolazione portata d'aria  
 3 - ventilatore premente  
 4 - preriscaldatore d'aria Ijungstrom  
 5 - condotti di distribuzione aria preriscaldata  
 6 - casse d'aria

- 7-11 percorso fumi  
 7 - camera di combustione  
 8 - condotti di scambio termico  
 9 - serrande di regolazione della depressione in c. di c.  
 10 - ventilatore aspirante  
 11 - camino

Fig. 32 - Schema del circuito aria-fumi nei grandi generatori di vapore

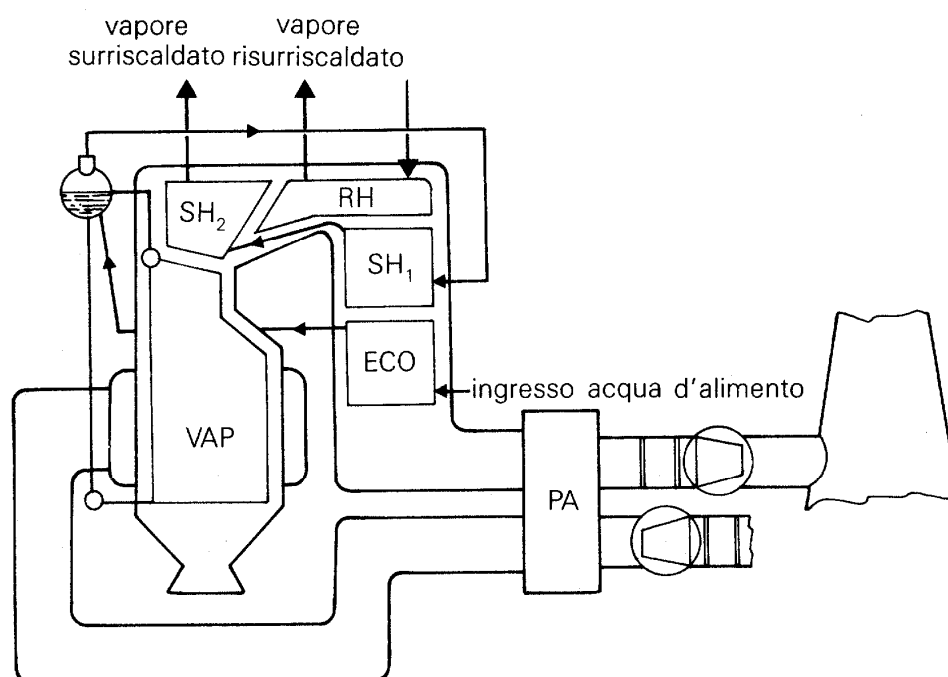


Fig. 33 - Schema del circuito acqua-vapore nei grandi generatori di vapore

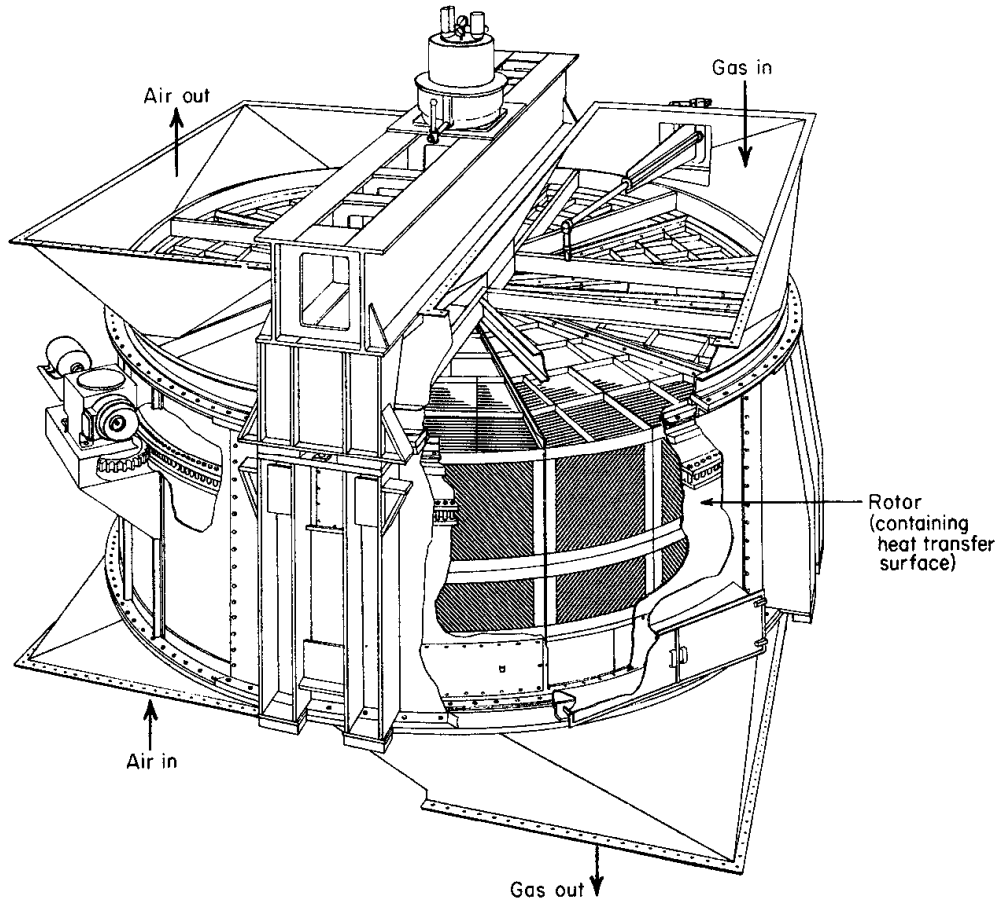


Fig. 34 - Preriscaldatore dell'aria comburente (Ljungström)

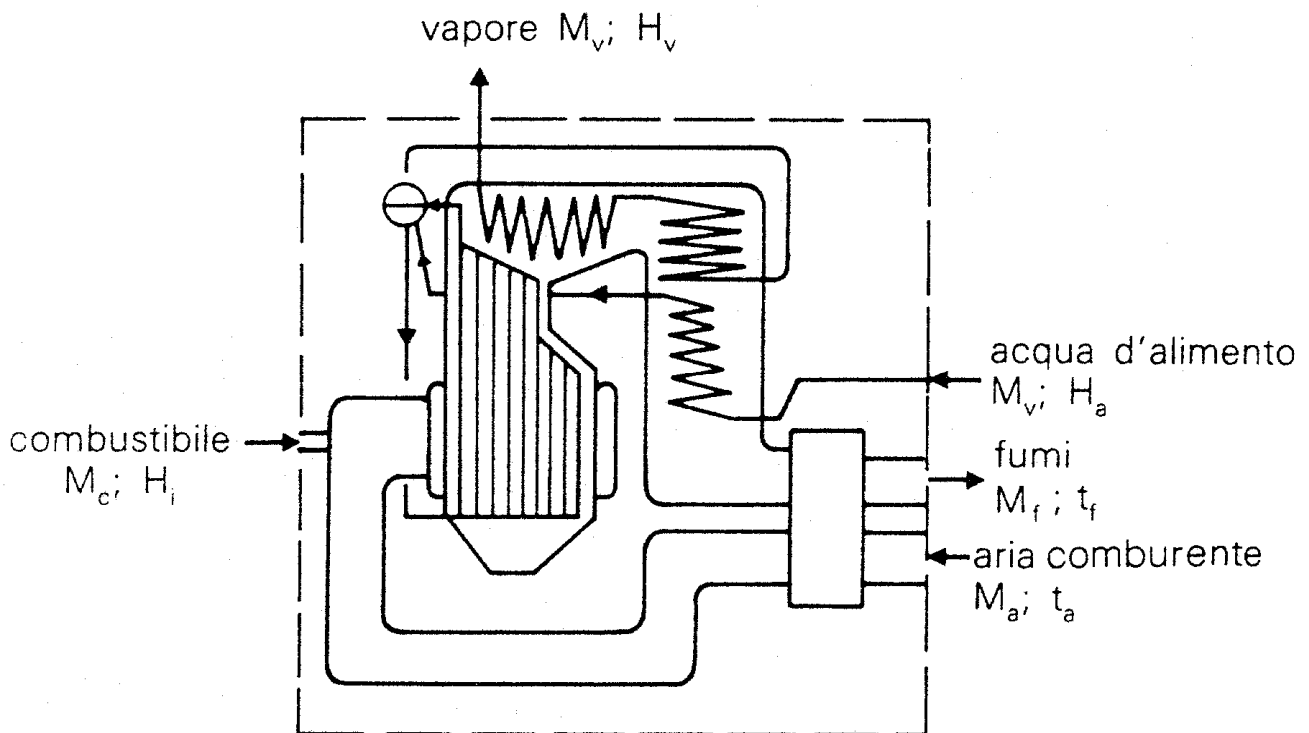


Fig. 35 - Rappresentazione schematica di un generatore di vapore surriscaldato subcritico

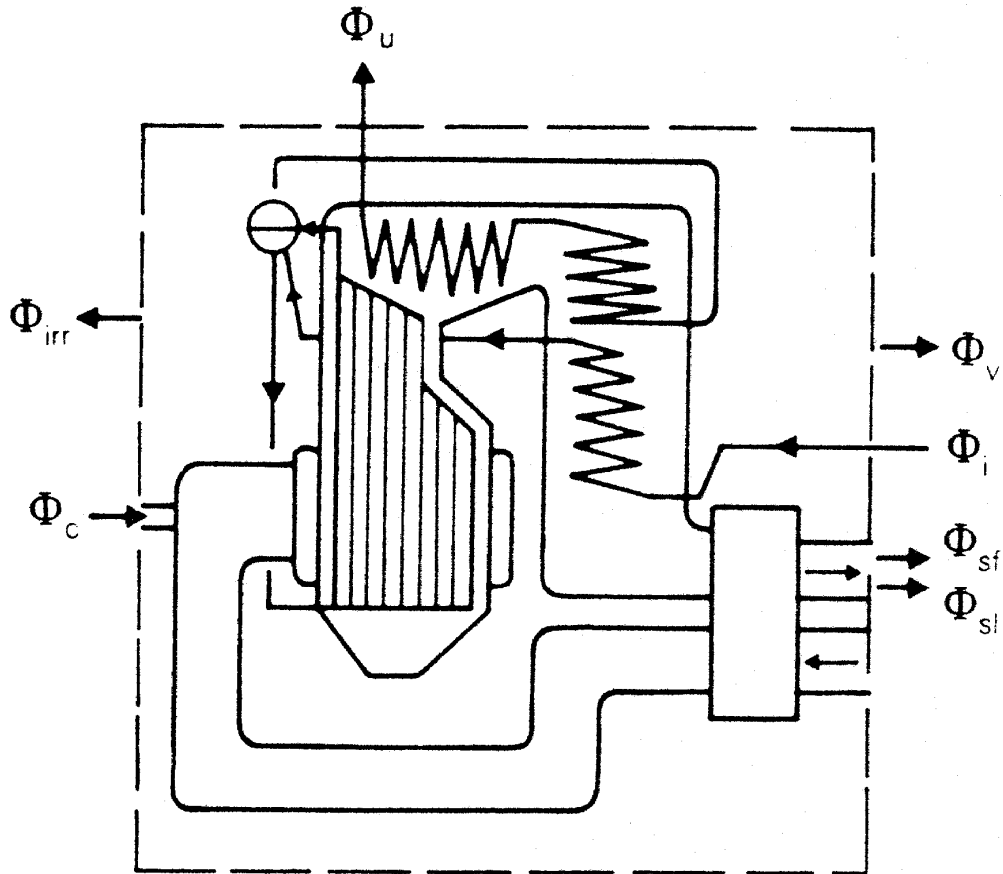


Fig. 36 - Generatore di vapore: flussi energetici

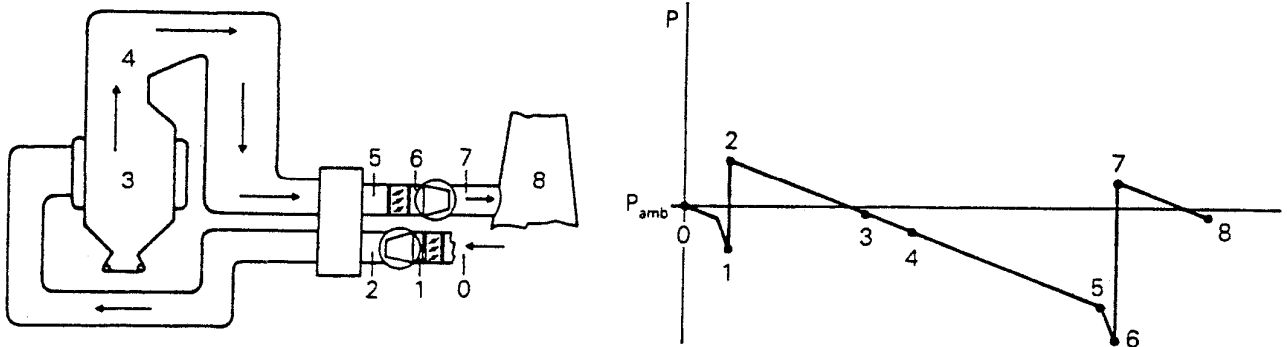


Fig. 37 - Generatore di vapore: tiraggio bilanciato

## COMBUSTIBILI

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

Tipo di combustibile	Composizione volumetrica [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> (c)]								Potere calorifico a 25°C				Densità normale [kg/m <sub>n</sub> <sup>3</sup> ]	Aria stechiometrica	
	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> O	O <sub>2</sub>	Altri	[kJ/kg]		[kJ/m <sub>3</sub> ]			[kg(a)/kg(c)]	[m <sup>3</sup> (a)/m <sup>3</sup> (c)]
									superiore	inferiore	superiore	inferiore			
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
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
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
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
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
Ossido di carbonio	—	1	—	—	—	—	—	—	10.100	10.100	12.630	12.630	1,250	2,46	2,38
Metano	—	—	—	—	1	—	—	—	55.550	50.050	39.830	35.890	0,717	17,2	9,52
Acetilene	—	—	—	—	—	—	—	1	50.000	48.300	58.550	56.560	1,171	13,1	11,9
Propano	—	—	—	—	—	—	—	1	50.400	46.350	101.800	93.630	2,02	15,5	23,8
n-Butano	—	—	—	—	—	—	—	1	49.600	45.800	133.900	123.650	2,7	15,4	30,9

\* C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>: 0,066; C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>: 0,021; idrocarburi superiori: 0,009.

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 <sup>3</sup> ]	Potere calorifico 15°C		Aria stechiom. [kg(a)/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	42.600 ÷ 46.000	40.200 ÷ 43.100	~14,5
Benzina auto	0,855	0,144	0,001	—	0,74	47.200	44.000	14,8
Cherosene	0,863	0,136	0,001	—	0,79	46.500	43.500	14,6
Gasolio	0,863	0,127	0,003	0,007	0,88	45.700	42.900	14,3
Olio comb. fluidissimo	0,862	0,123	0,01	0,005	0,89	44.600	41.850	14,2
Olio comb. denso BTZ	0,87	0,11	0,01	0,01	0,95	43.500	41.100	13,8
Olio di catrame (da carbone)	0,895	0,065	0,005	0,03	1,08	38.950	37.500	12,5
Olio di catrame (da lignite)	0,851	0,122	0,005	0,022	0,825	44.500	41.800	13,9
Olio Ragusa tipo C	0,854	0,109	0,029	0,008	0,97	42.200	39.800	13,7
Olio vegetale	0,772	0,12	0,001	0,107	0,90-0,92	41.200	38.550	12,7
Alcol metilico	0,375	0,126	—	0,499	0,79	22.650	19.900	6,51
Alcol etilico	0,521	0,131	—	0,348	0,79	29.700	26.800	9,01
Benzolo	0,923	0,077	—	—	0,88	41.800	40.100	13,27
Etere etilico	0,648	0,136	—	0,216	0,72	36.800	33.800	11,21

\* l'eventuale complemento a 1 è [H<sub>2</sub>O].

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 <sub>2</sub> 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



PROCESSI DI COMBUSTIONE

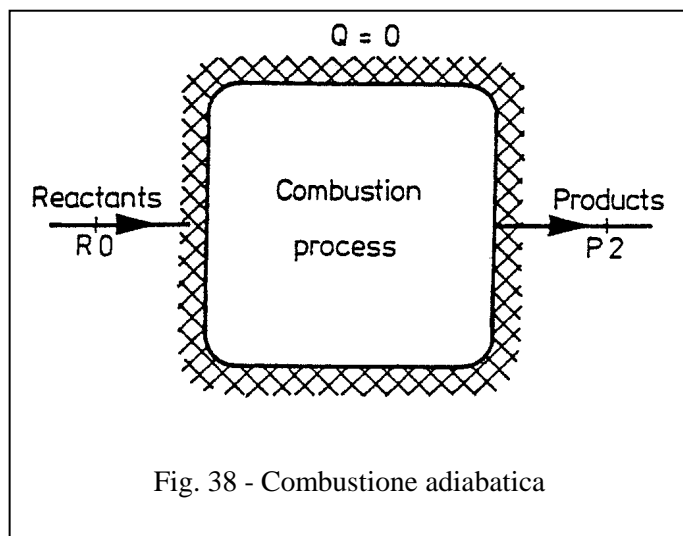


Fig. 38 - Combustione adiabatica

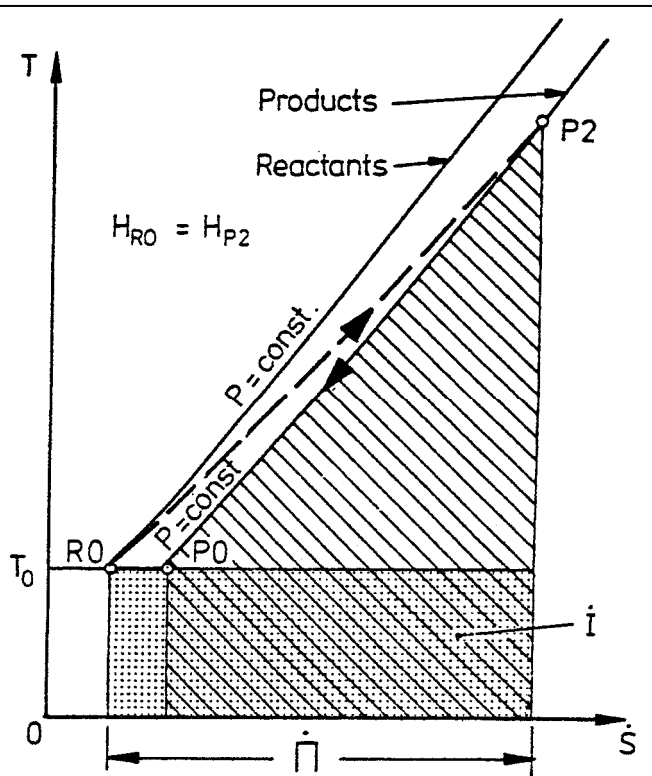


Fig. 39 - Irreversibilità di combustione adiabatica

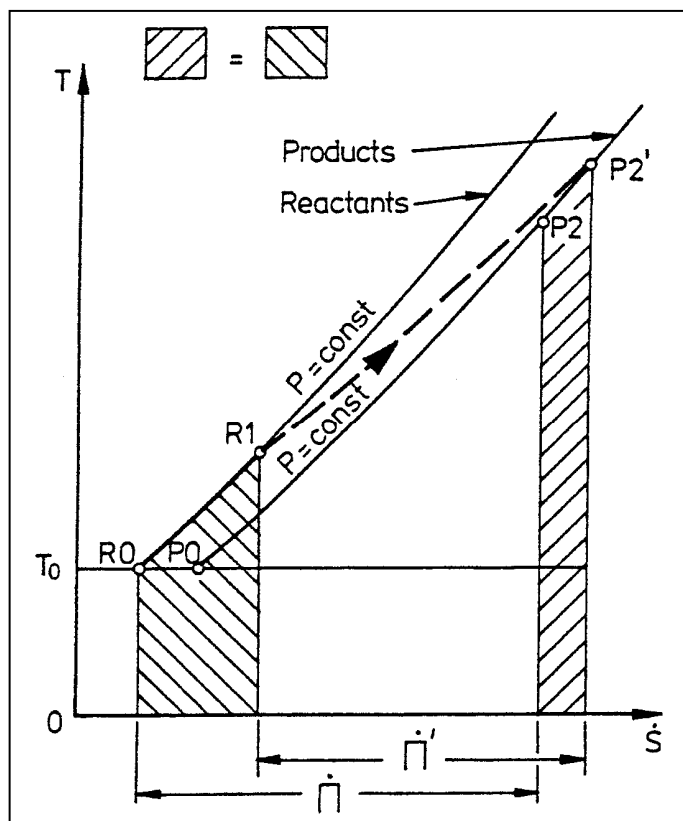


Fig. 40 - Riduzione delle irreversibilità mediante preriscaldamento dei reagenti

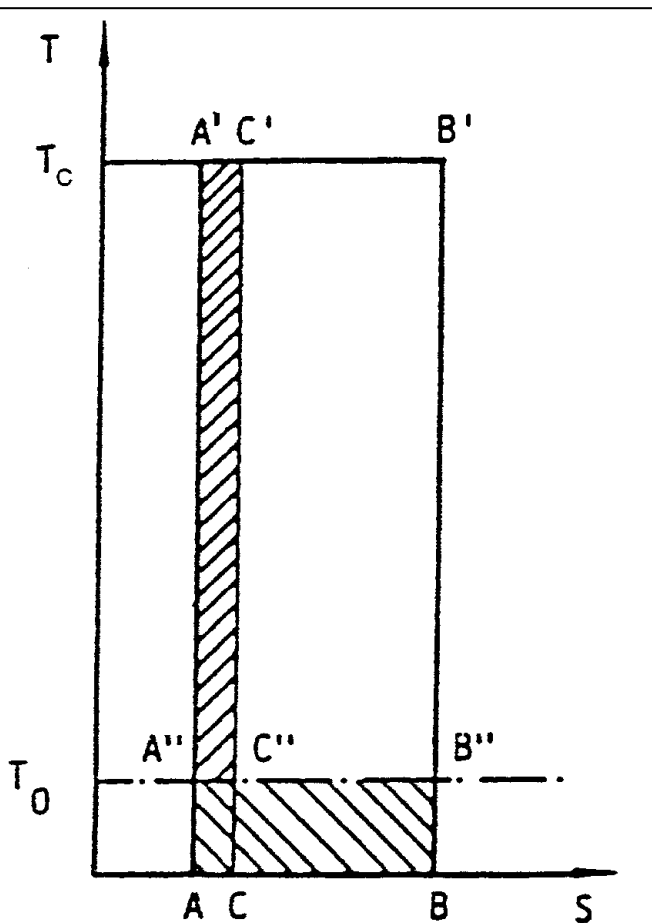


Fig. 41 - Irreversibilità di combustione non adiabatica

## ANALISI ENERGETICA DEL GENERATORE DI VAPORE

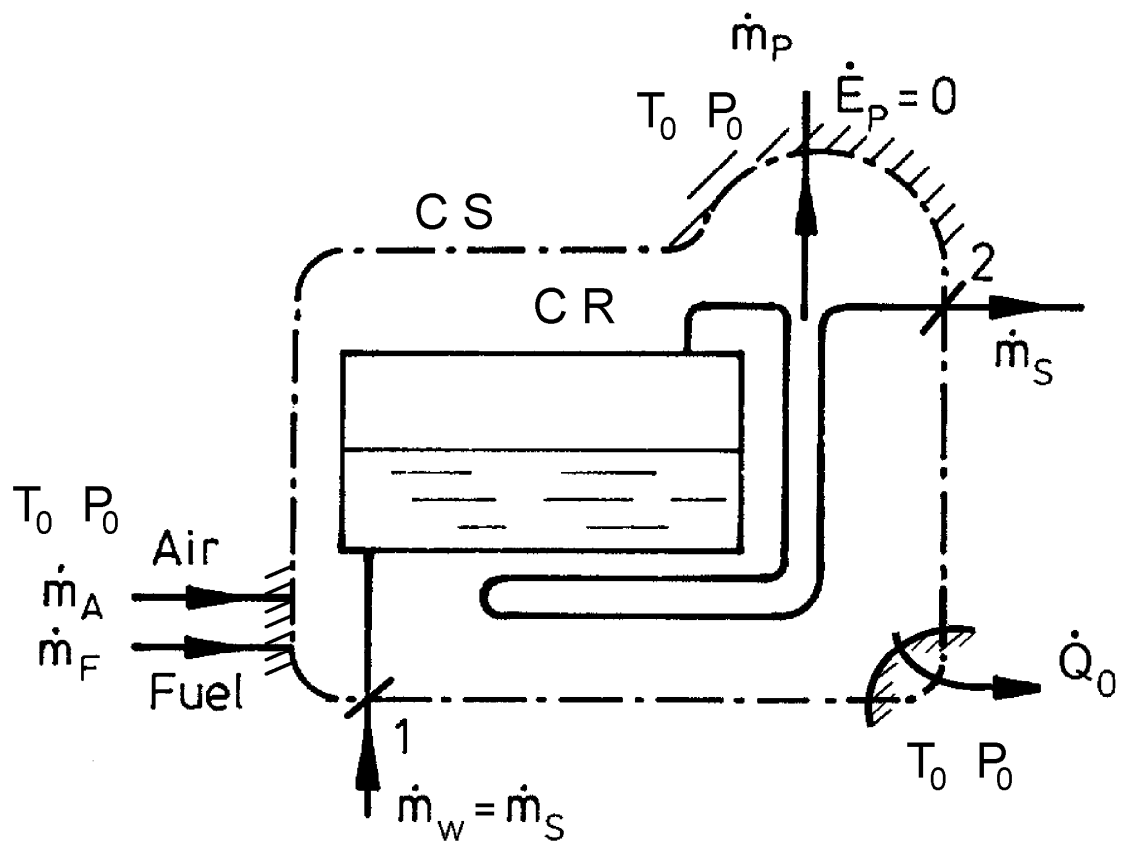


Fig. 42 - Schema dei trasferimenti di materia e di energia che interessano la CR oggetto di studio

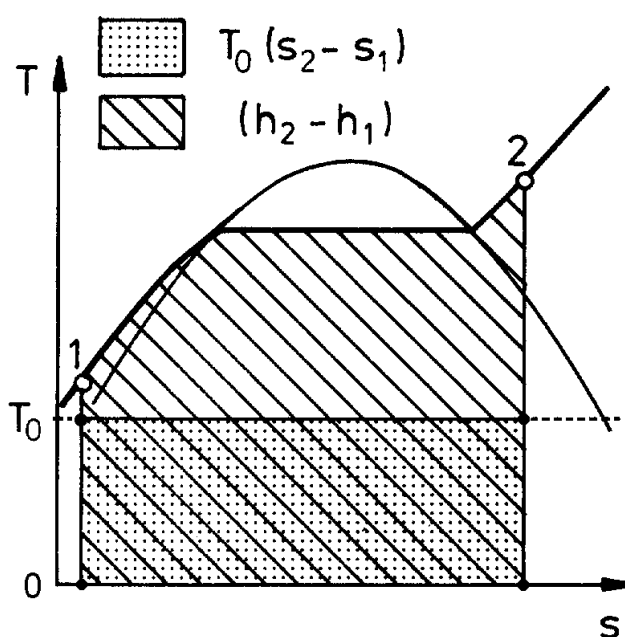
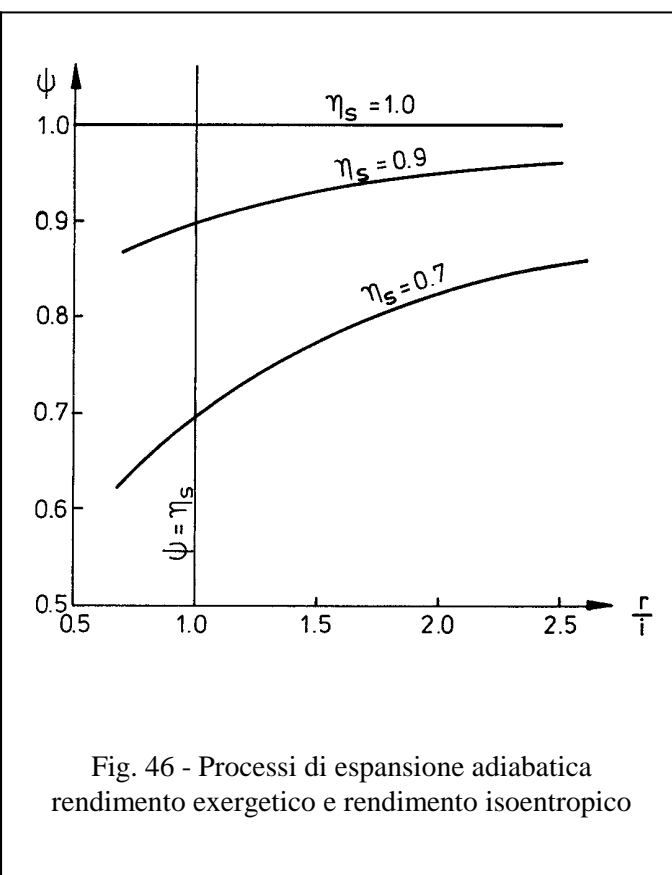
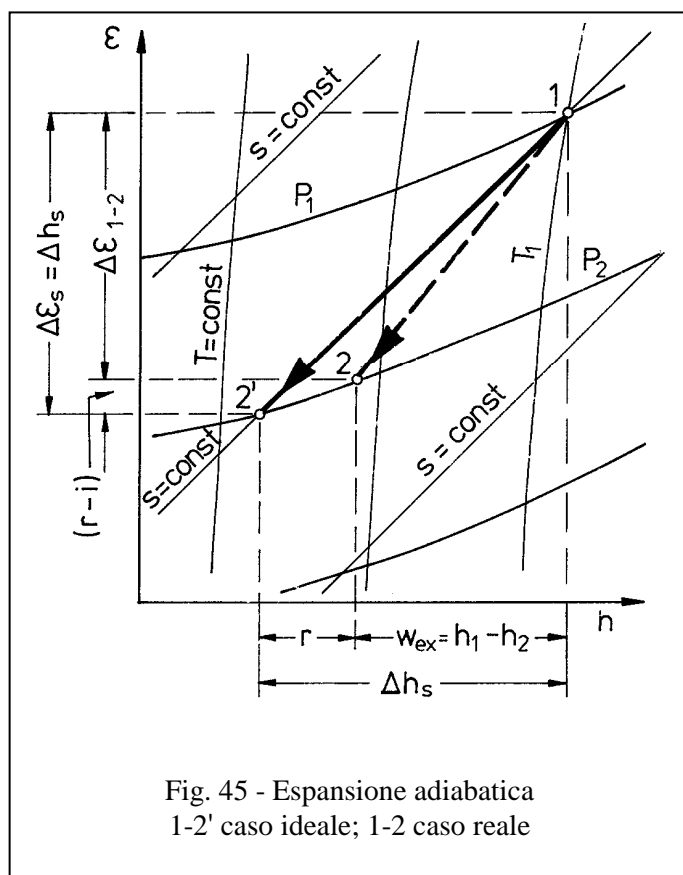
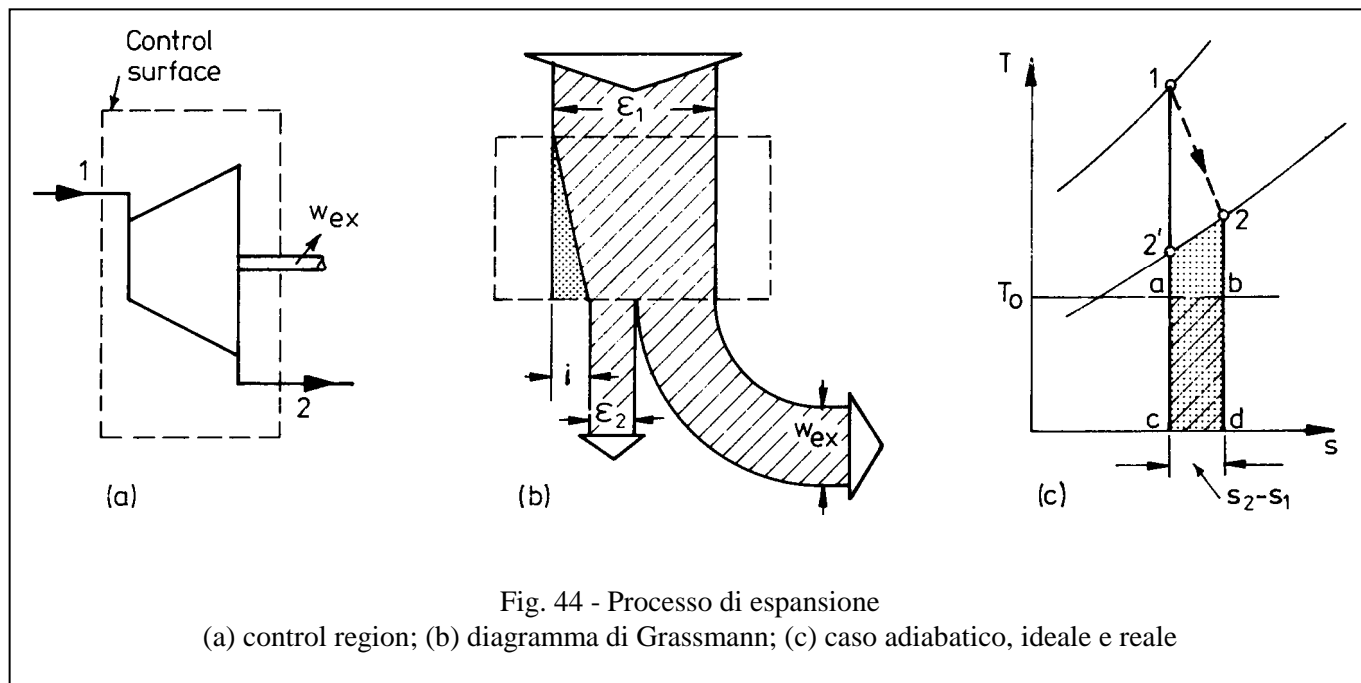
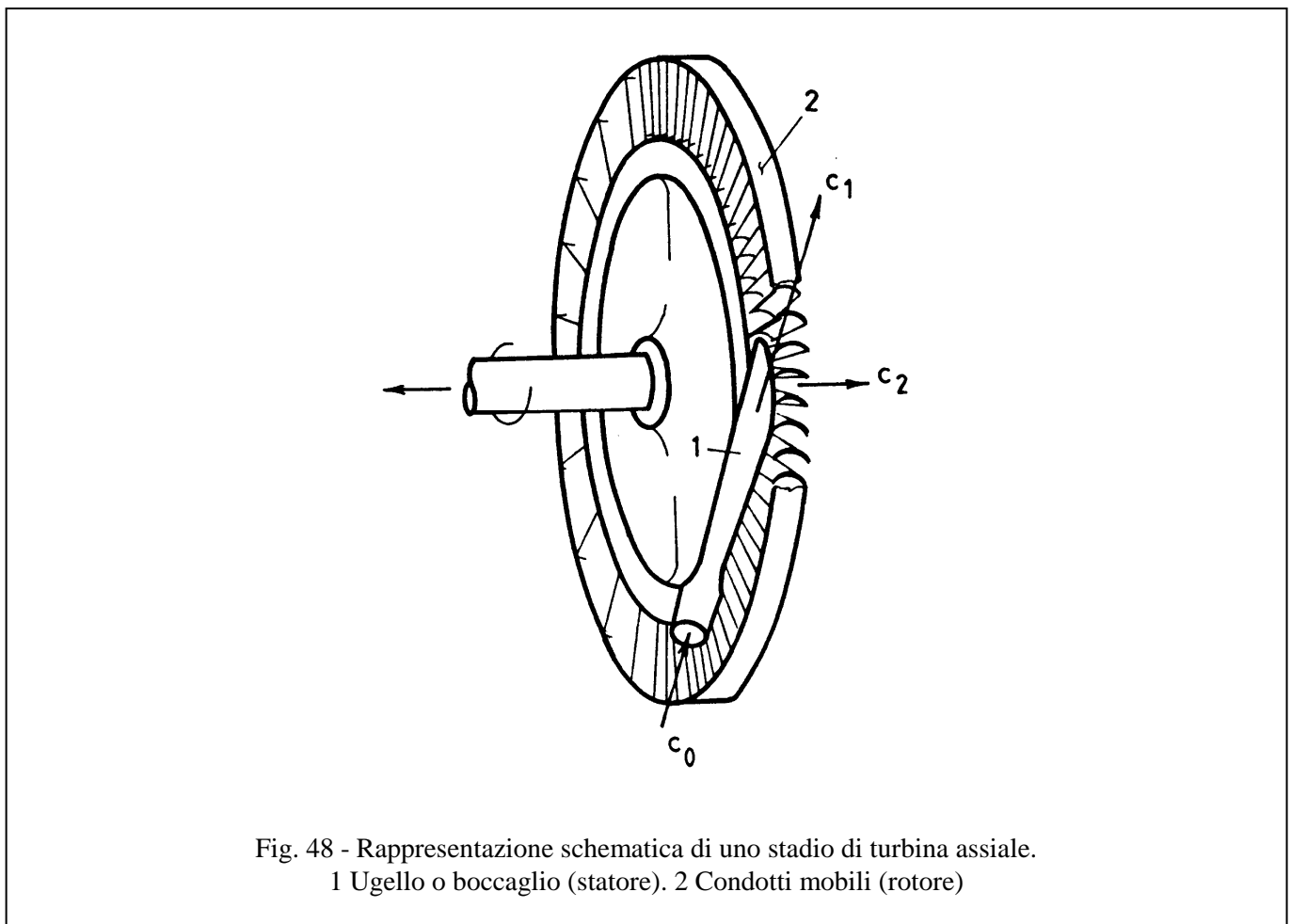
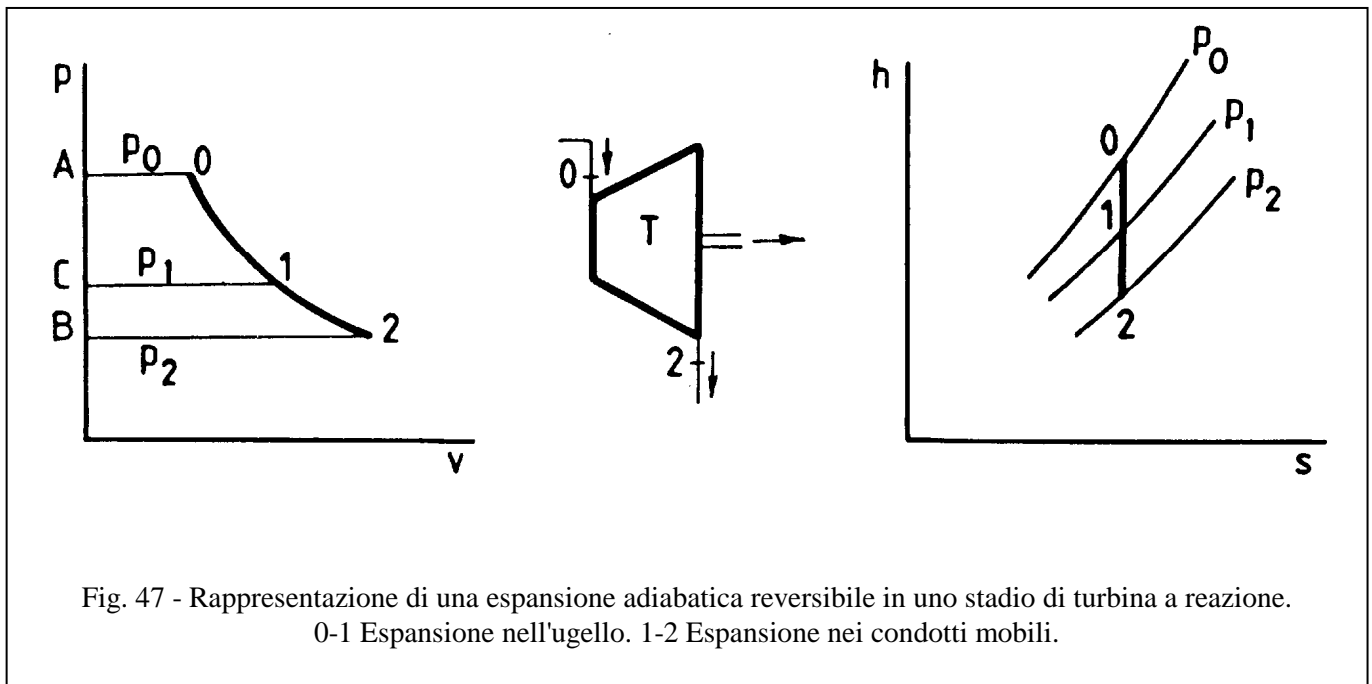


Fig. 43 - processo termodinamico dell'acqua-vapore che attraversa la CR oggetto di studio

MOTRICI DINAMICHE (TURBINE)





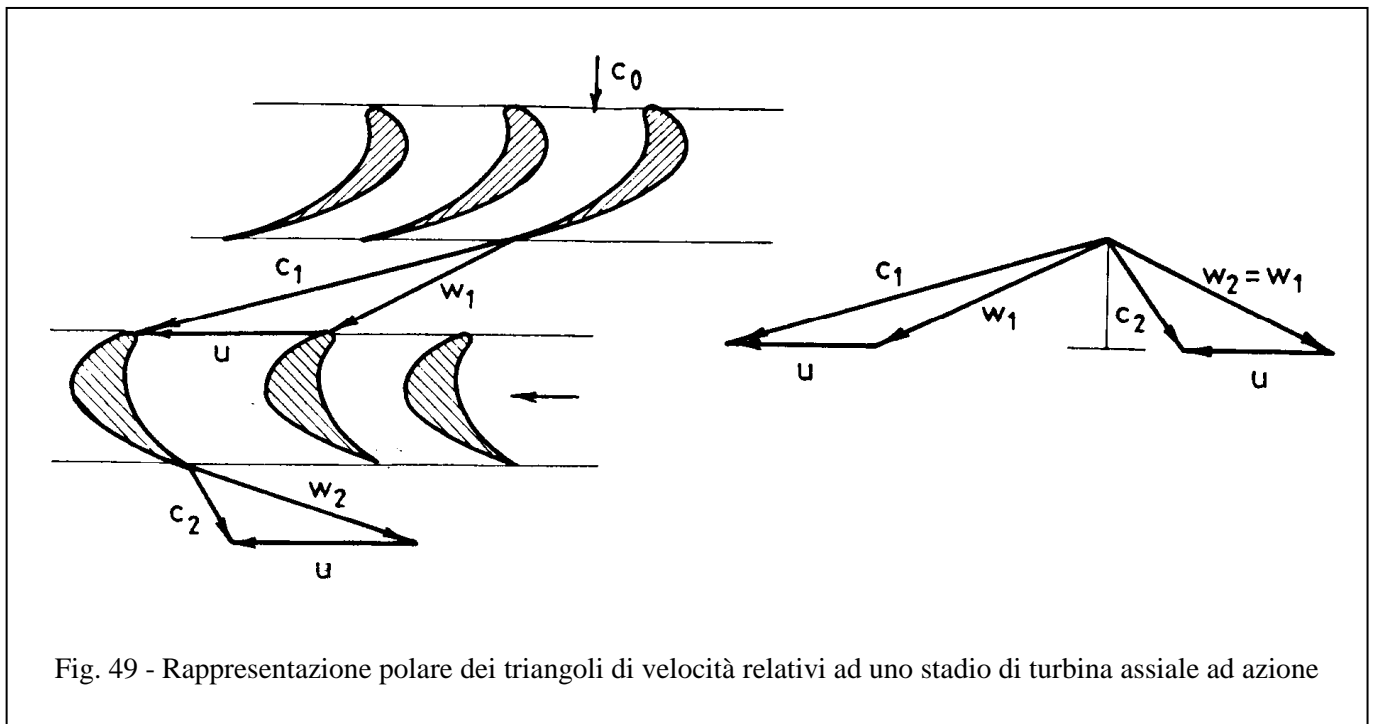


Fig. 49 - Rappresentazione polare dei triangoli di velocità relativi ad uno stadio di turbina assiale ad azione

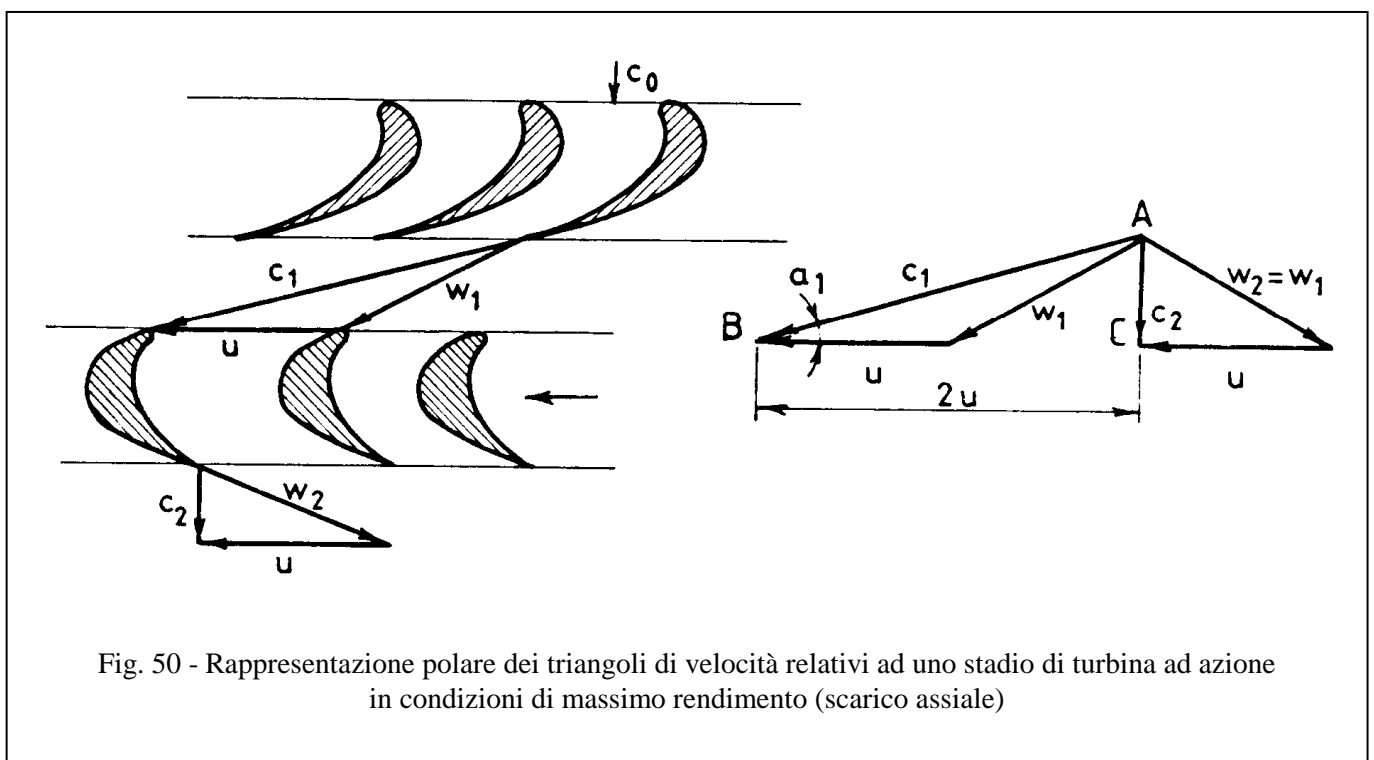


Fig. 50 - Rappresentazione polare dei triangoli di velocità relativi ad uno stadio di turbina ad azione in condizioni di massimo rendimento (scarico assiale)

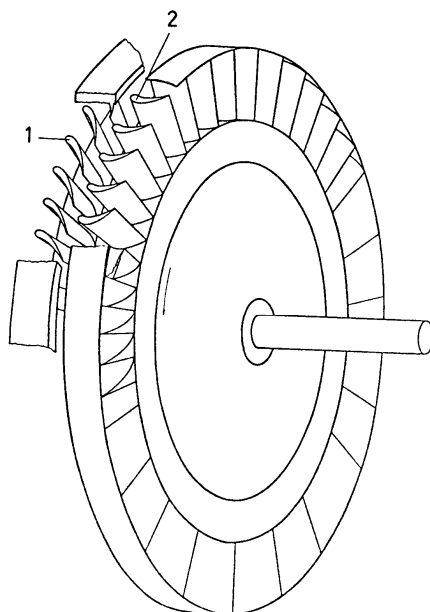


Fig. 51 - Stadio a reazione di una turbina assiale  
1 paletta statorica; 2 paletta rotorica

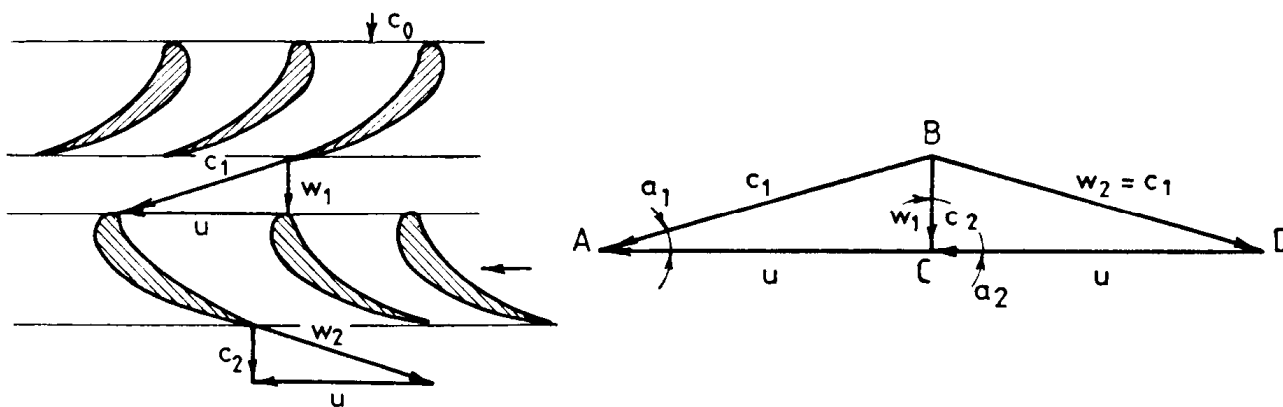


Fig. 52 - Rappresentazione polare dei triangoli di velocità relativi ad uno stadio di turbina assiale a reazione (con grado di reazione  $R = 0,5$ ) in condizioni di massimo rendimento (scarico assiale)

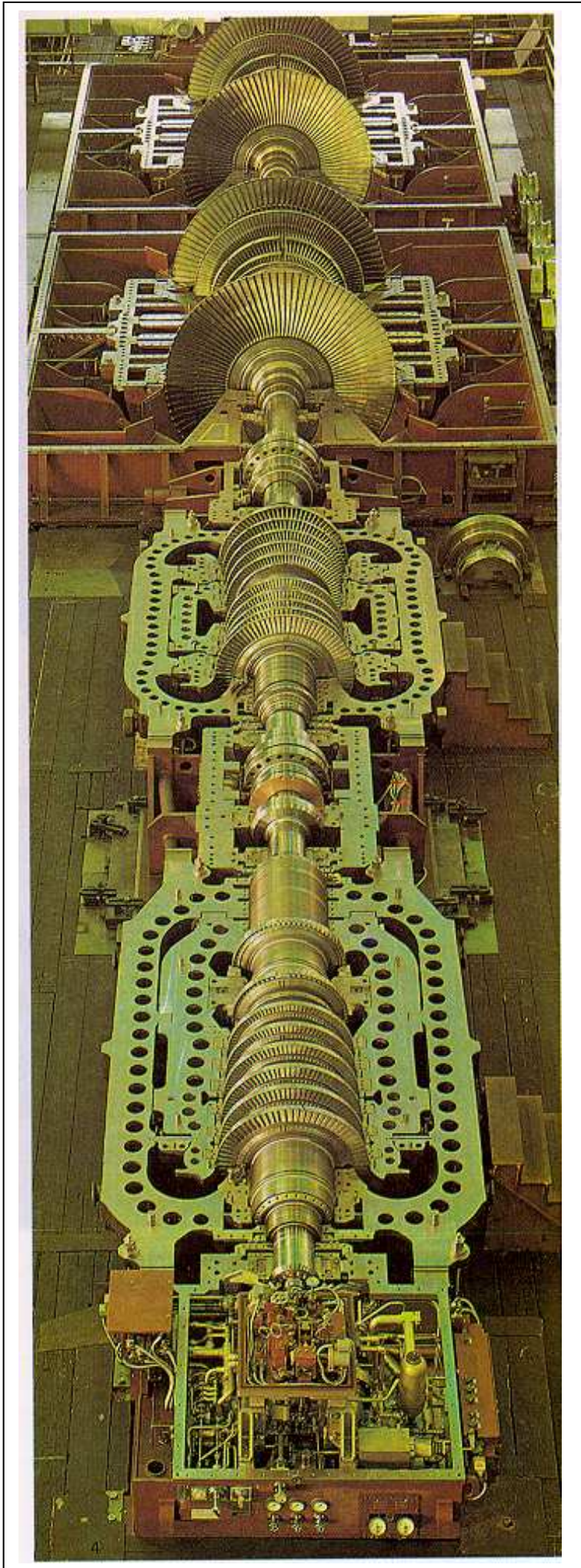


Fig. 53 - Turbina a vapore da 700 MW  
(si noti in primo piano il corpo di alta pressione  
seguito da quello di media pressione a doppio  
flusso il quale precede i due corpi di bassa  
pressione tra loro in parallelo ed entrambi a  
doppio flusso)

## BIBLIOGRAFIA

- Acton, Caputo, "Introduzione allo studio delle Macchine", UTET, Torino, 1979.
- Çengel, "Termodinamica e trasmissione del calore", McGraw-Hill, 1998.
- Kotas, "The Exergy Method of Thermal Plant Analysis", Krieger, Melbourne (Florida), 1995.
- Della Volpe, "Macchine", Liguori Editore, 1994.
- Acton, Caputo, "Impianti motori", UTET, Torino, 1992.

## INDICE

Frontespizio .....	1
Vapore saturo .....	2
Vapore d'acqua saturo .....	3
Risurriscaldamento del vapore.....	8
Spillamenti di vapore .....	9
Generatori di vapore .....	13
Combustibili .....	16
Processi di combustione .....	17
Analisi energetica del generatore di vapore .....	18
Motrici dinamiche (turbine).....	19
Bibliografia .....	24
Indice .....	24