



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PISA
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

7. Sistemi Combinati

Roberto Lensi

DIPARTIMENTO DI ENERGETICA

Anno Accademico 2007-08

SISTEMI COMBINATI GAS/VAPORE

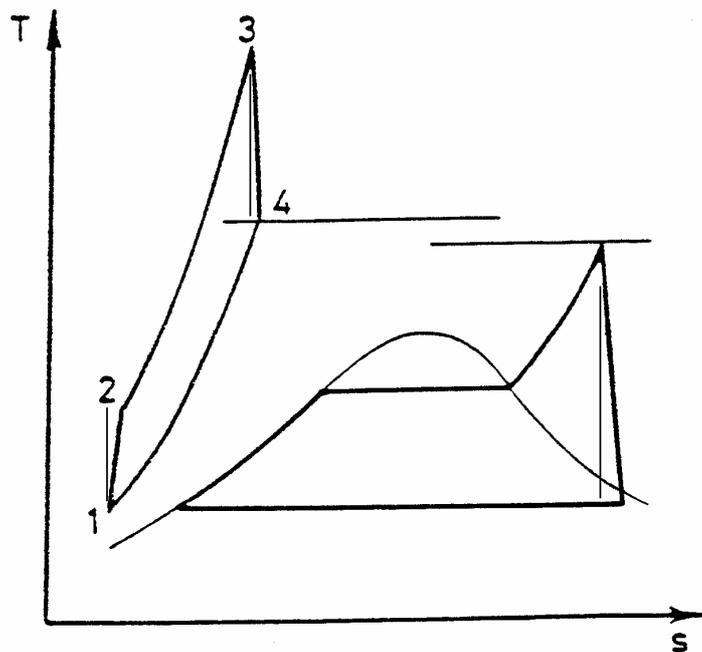


Fig. 1 - Diagramma entropico qualitativo per un sistema combinato gas/vapore

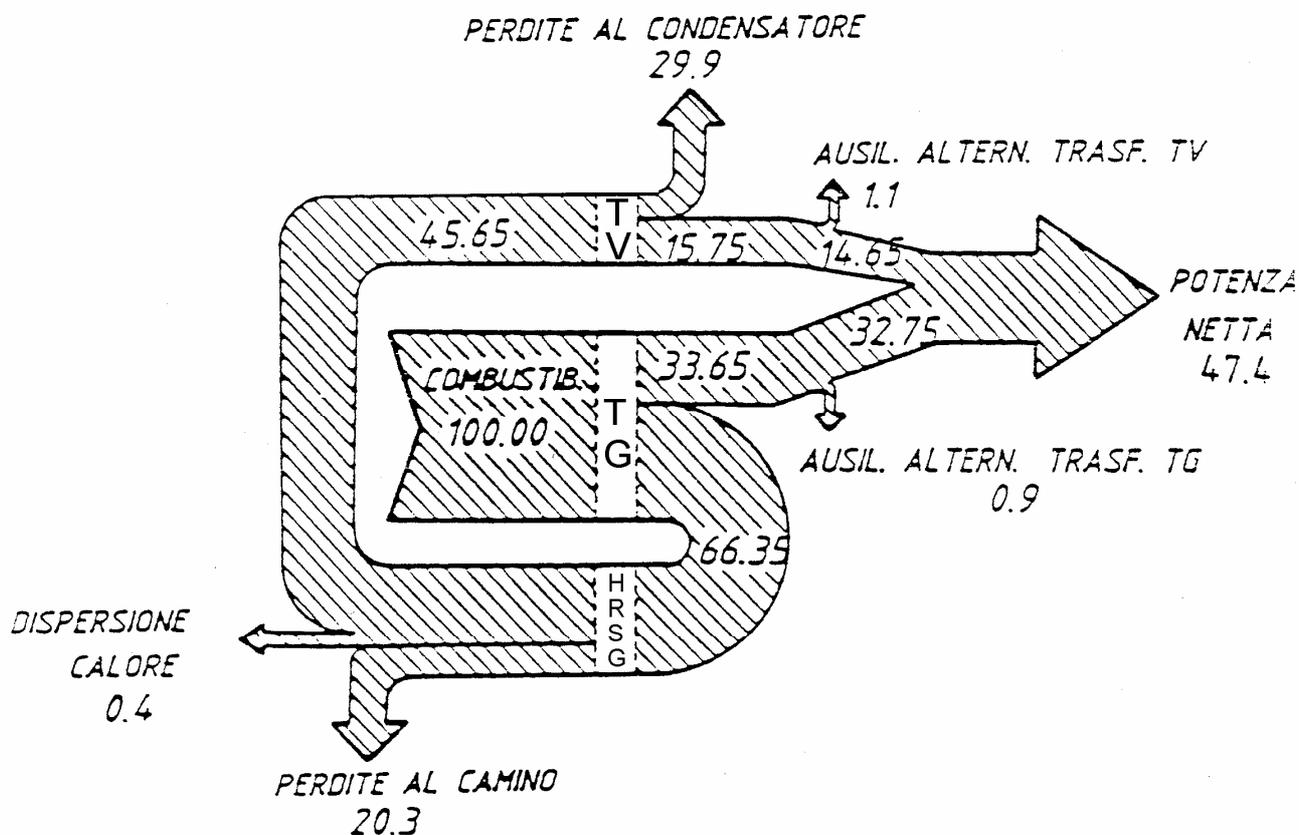


Fig. 2 - Diagramma di Sankey per un sistema combinato gas/vapore tipico

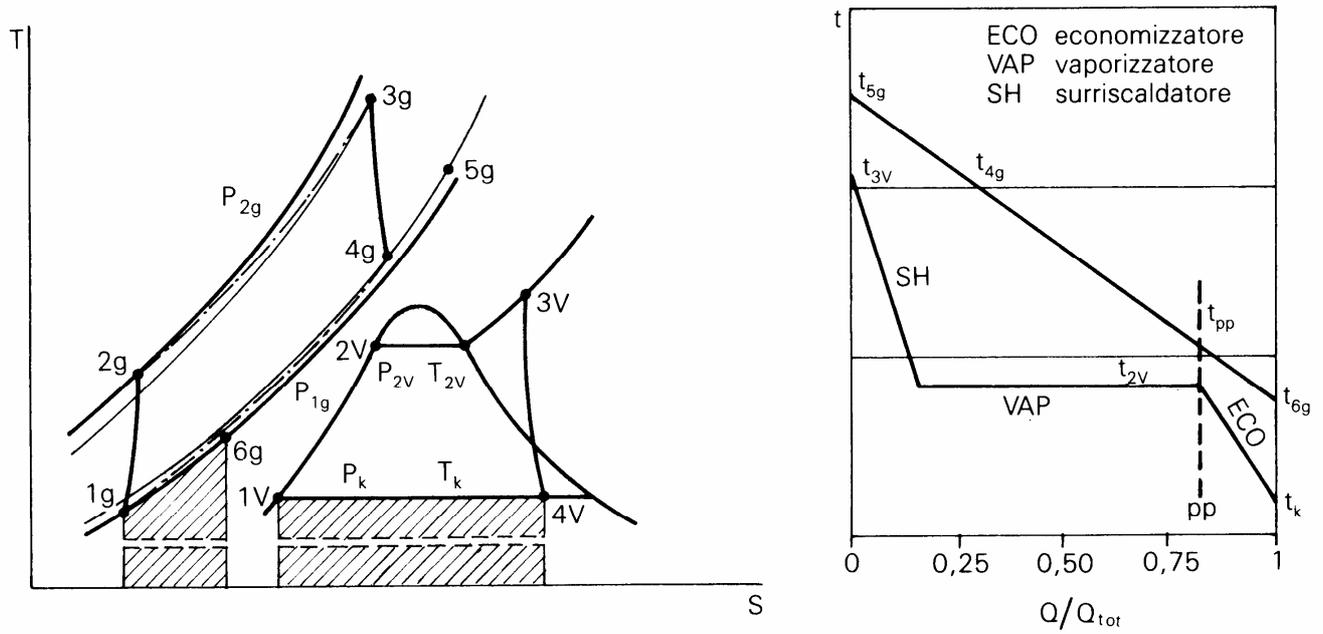


Fig. 3 - Sistema combinato gas/vapore: ciclo sovrapposto a gas e ciclo sottoposto a vapore; diagramma delle temperature dei gas di scarico e del sistema acqua-vapore in un generatore di vapore a recupero di calore (HRSG)

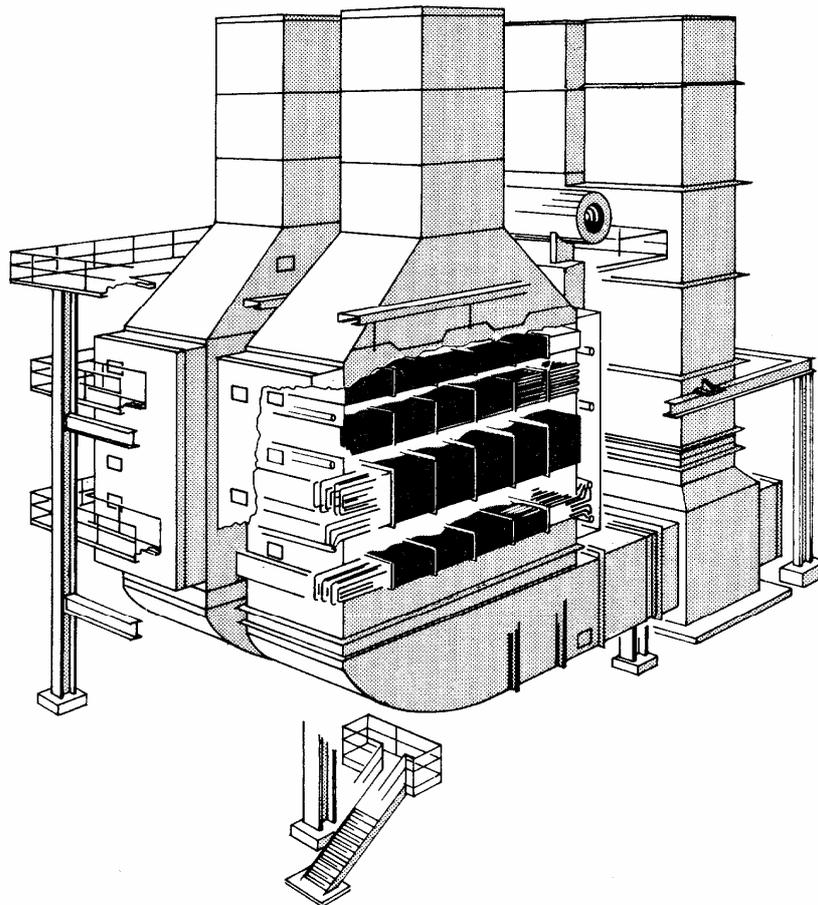


Fig. 4 - Generatore di vapore a recupero di calore HRSG (Heat Recovery Steam Generator)

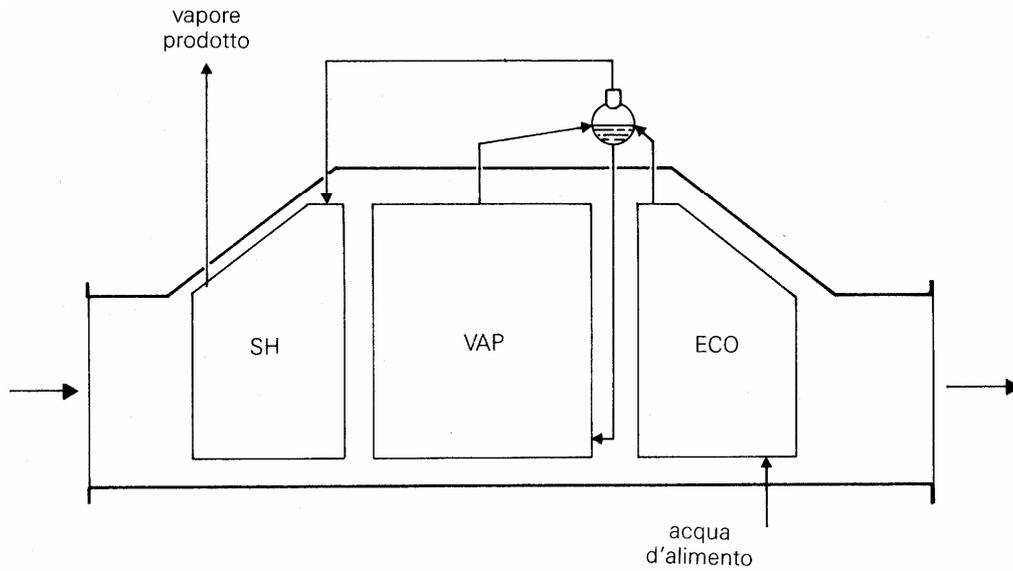


Fig. 5 - Schema di caldaia a recupero di calore

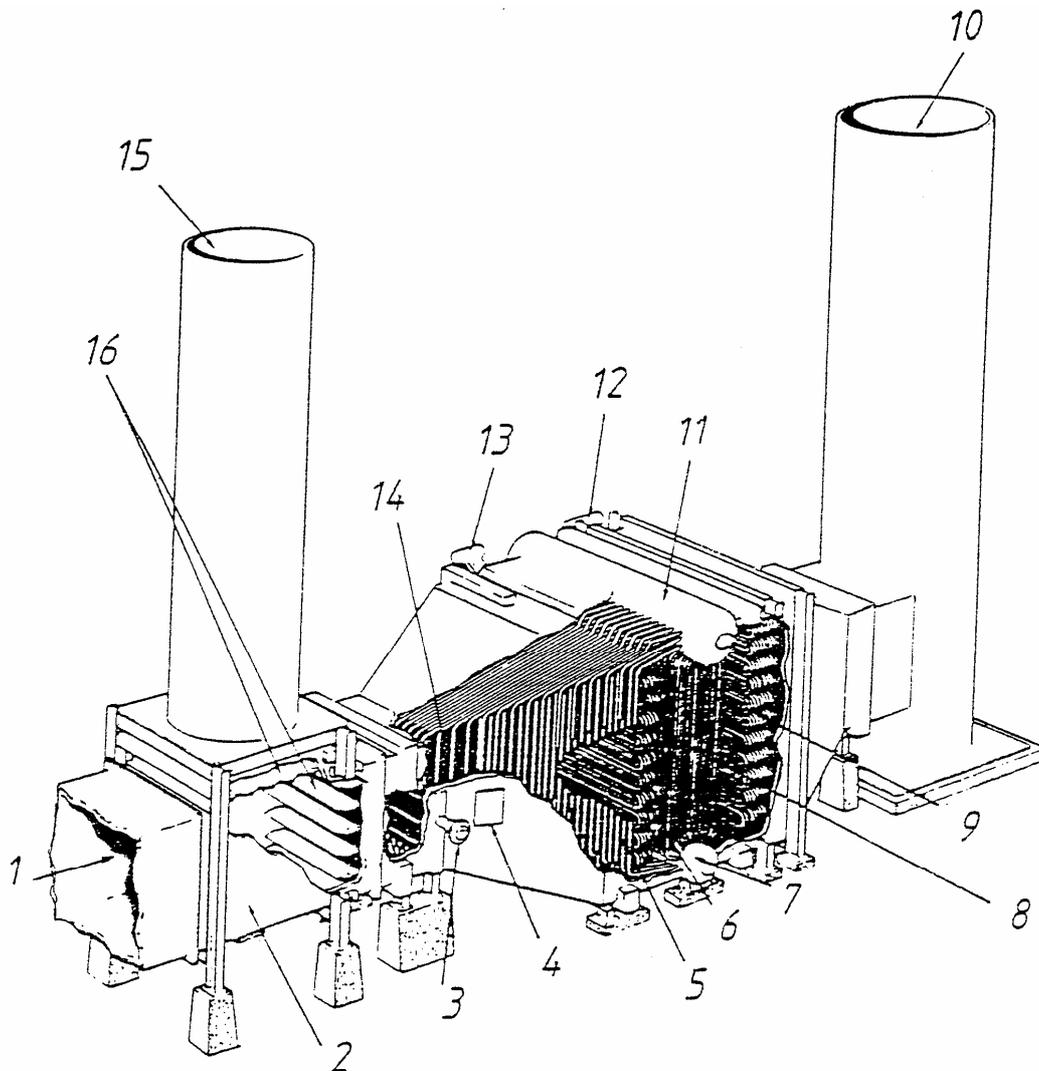


Fig. 6 - Caldaia a recupero con bruciatori ausiliari

1 ingresso gas combusti provenienti dalla turbina; 2 camera di collegamento; 3 bruciatori metano; 4 alloggiamento per eventuali bruciatori gasolio; 5 schermo di tubi; 6 tubi ad U del surriscaldatore; 7 collettore acqua; 8 fascio di tubi evaporatori; 9 tubi ad U dell'economizzatore; 10 camino principale; 11 collettore cilindrico acqua-vapore; 12 uscita dall'economizzatore; 13 uscita dal surriscaldatore; 14 muri d'acqua; 15 camino di by-pass; 16 serrande principali di deviazione gas combusti

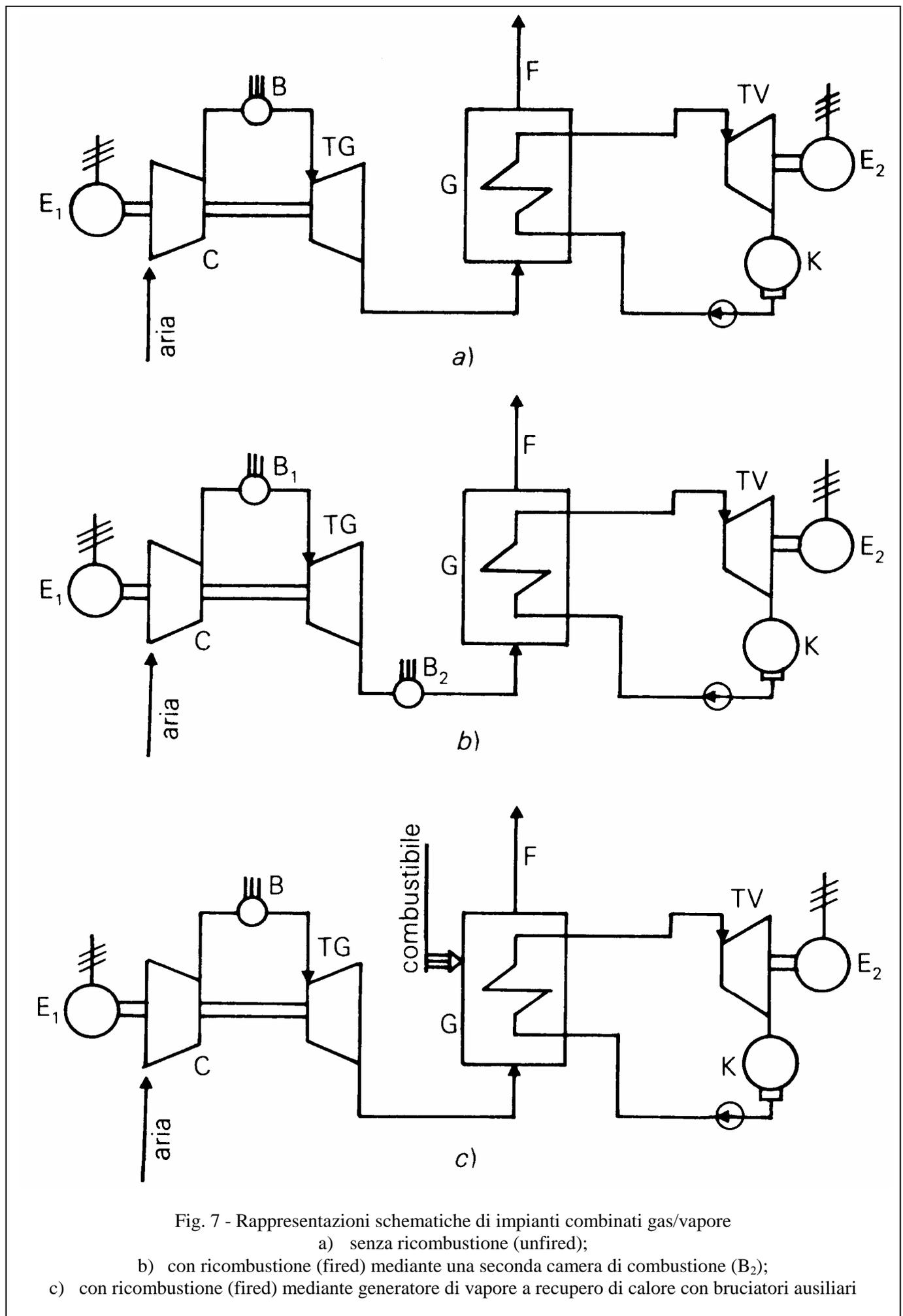


Fig. 7 - Rappresentazioni schematiche di impianti combinati gas/vapore

a) senza ricombustione (unfired);

b) con ricombustione (fired) mediante una seconda camera di combustione (B₂);

c) con ricombustione (fired) mediante generatore di vapore a recupero di calore con bruciatori ausiliari

Turbotecnica

**NUOVO PIGNONE / TURBOTECNICA - COMBINED CYCLE
PRODUCT LINE AND PERFORMANCES**

COMBINED CYCLE TYPE	GAS TURBINES Qty - TYPE	G.T. OUTPUT (MW)	S.T. OUTPUT (MW)	NET OUTPUT (MW)	EFFICIENCY (%)
CC 201	2 PGT 10	19	10	28.3	44.5
CC 105	1 MS 5001 PA	25.8	15	40	44
CC 205	2 MS 5001 PA	51.6	30.4	80.4	44.2
CC 106 B	1 MS 6001 B	37.7	21.6	58.3	48
CC 206 B	2 MS 6001 B	75.4	44.2	118	48.5
CC 106 FA	1 MS 6001 FA	69	38.3	105.7	51.5
CC 206 FA(*)	2 MS 6001 FA	138	79	215	52.3
CC 109 E	1 MS 9001 E	122	66.5	185.5	51
CC 209 E	2 MS 9001 E	244	133.5	372	51.2
CC 109 EC	1 MS 9001 EC	169.2	96	259.6	53.5
CC 109 FA(*)	1 MS 9001 FA	223	127	345	54.5

Notes:

- PERFORMANCES REFERRED TO:

- ISO CONDITIONS
- NATURAL GAS FUEL
- 0.045 BAR CONDENSER VACUUM

(*) THREE PRESSURE REHEAT STEAM CYCLE FOR 206 FA AND 109 FA

February 1995

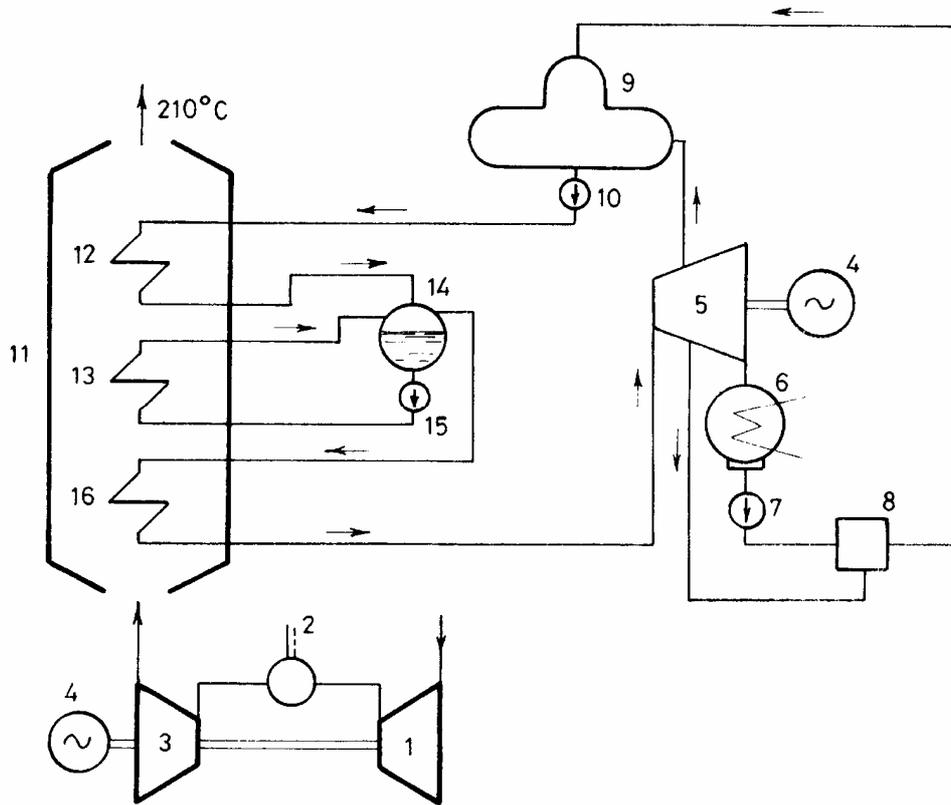


Fig. 8 - Rappresentazione schematica semplificata di un sistema combinato gas/vapore con HRSG ad un livello di pressione e con spillamenti rigenerativi

1 compressore; 2 camera di combustione; 3 turbina a gas; 4 alternatore; 5 turbina a vapore; 6 condensatore; 7 pompa di estrazione; 8 rigeneratore; 9 degasatore; 10 pompa di alimento; 11 caldaia a recupero; 12 economizzatore; 13 evaporatore; 14 collettore cilindrico; 15 pompa di circolazione; 16 surriscaldatore

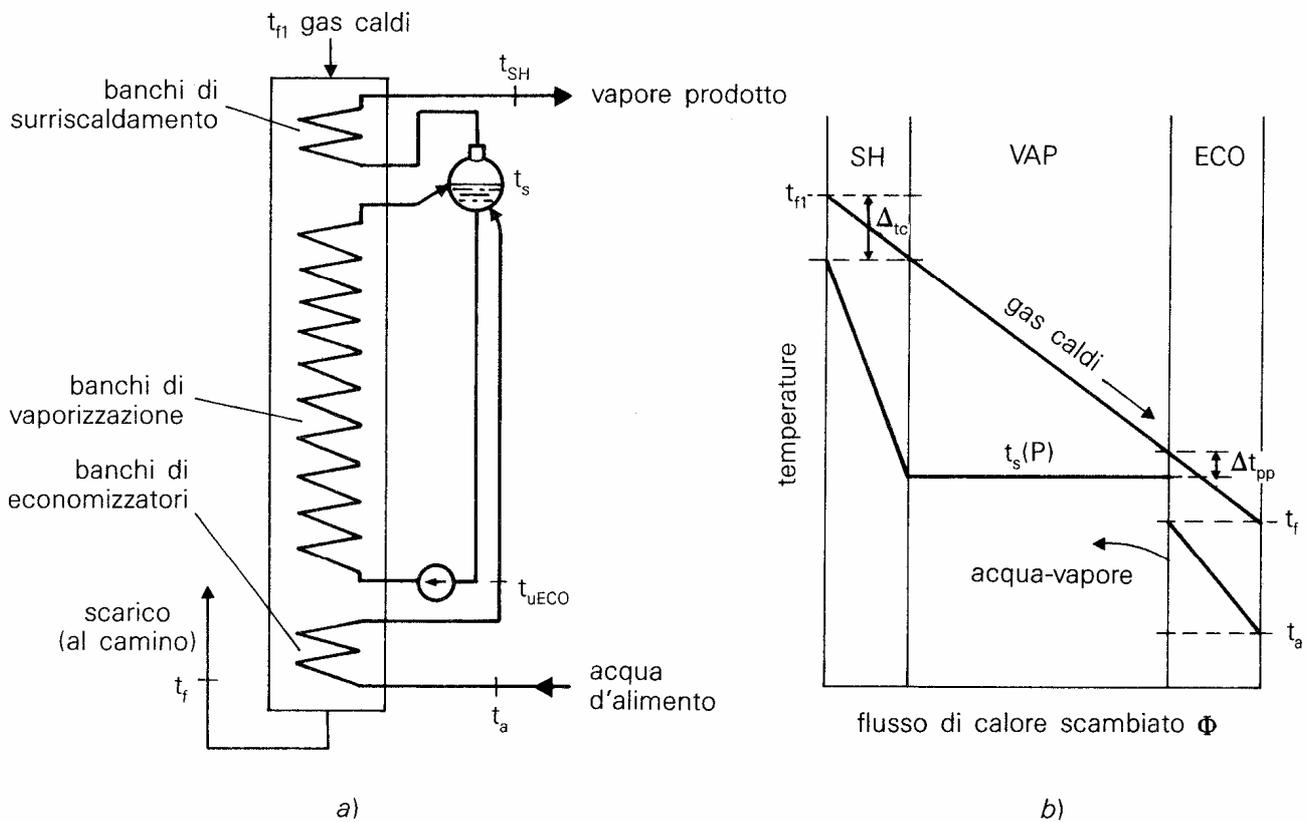


Fig. 9 - Caldaia a recupero a solo scambio convettivo ad un livello di pressione
 a) rappresentazione schematica; b) andamento delle temperature

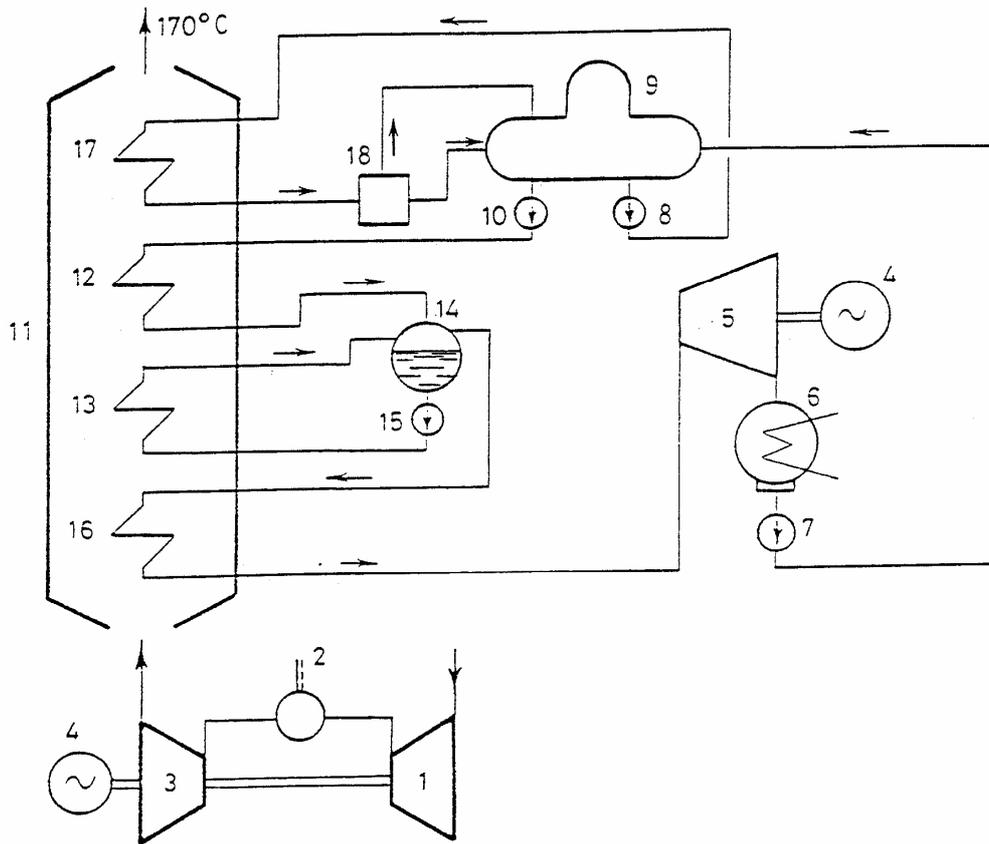


Fig. 10 - Rappresentazione schematica semplificata di un sistema combinato gas/vapore con HRSG ad un livello di pressione e senza spillamenti rigenerativi

1 compressore; 2 camera di combustione; 3 turbina a gas; 4 alternatore; 5 turbina a vapore; 6 condensatore; 7 pompa di estrazione; 8 pompa economizzatore bassa pressione; 9 degasatore; 10 pompa di alimento; 11 caldaia a recupero; 12 economizzatore; 13 evaporatore; 14 collettore cilindrico; 15 pompa di circolazione; 16 surriscaldatore; 17 economizzatore bassa pressione; 18 separatore di vapore

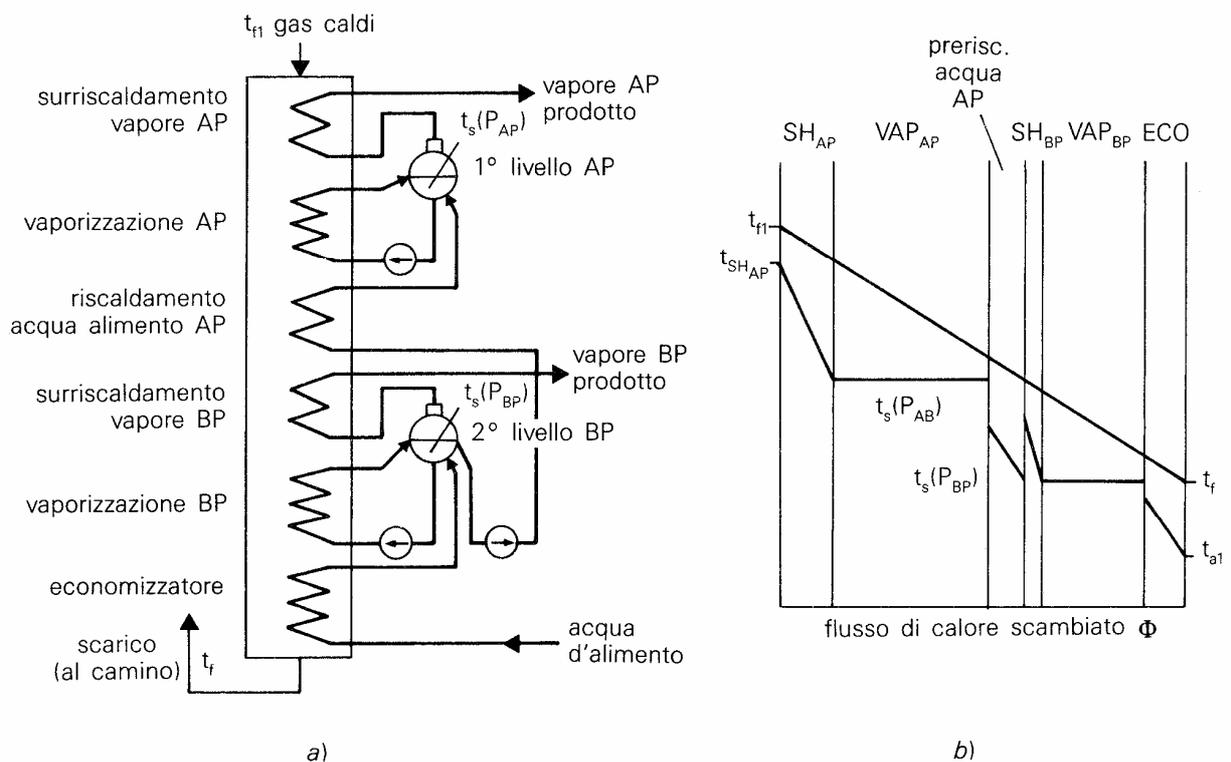
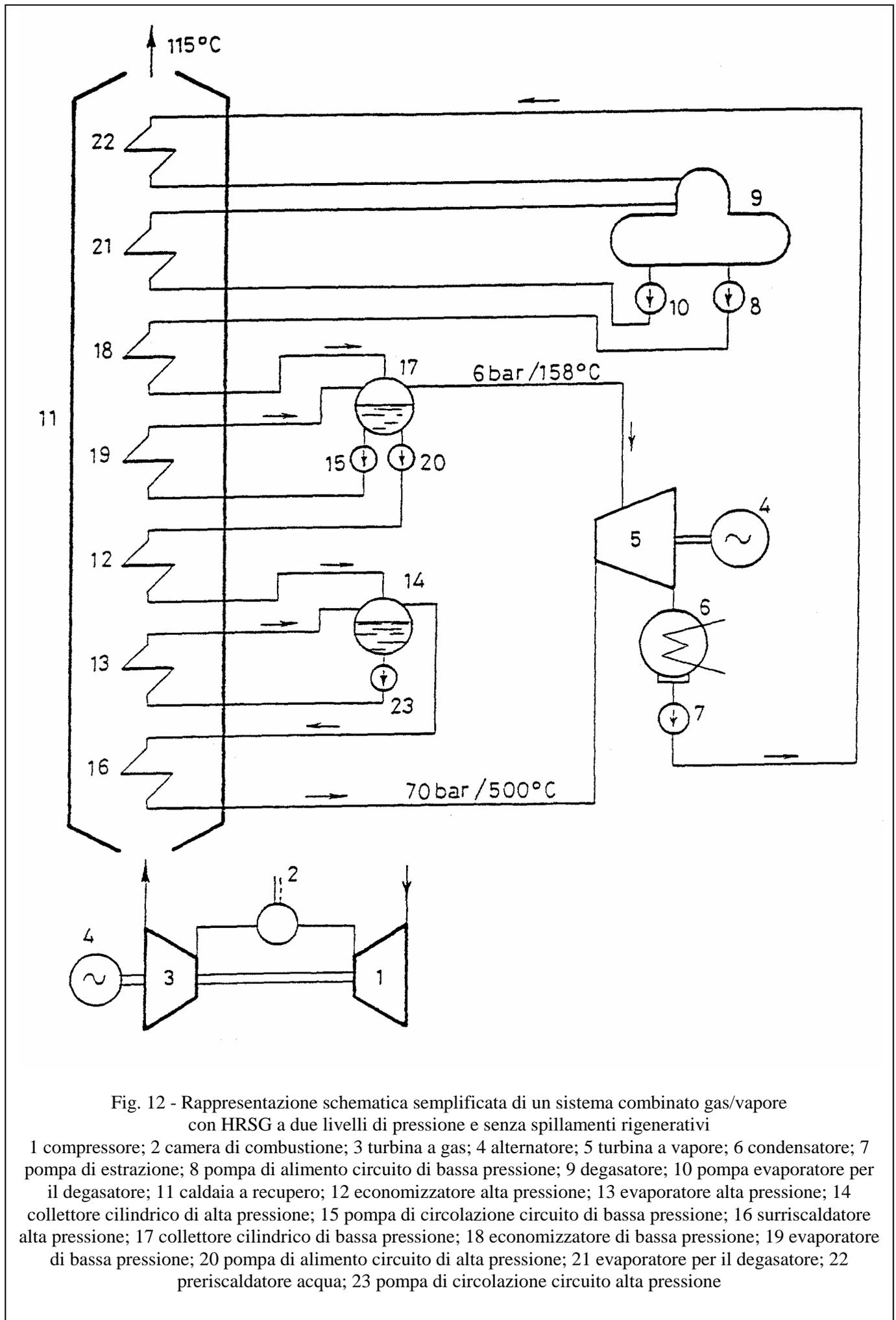


Fig. 11 - Caldaia a recupero a solo scambio convettivo a due livelli di pressione
a) rappresentazione schematica; b) andamento delle temperature



RIPOTENZIAMENTO DELLE CENTRALI TERMOELETTRICHE A VAPORE (REPOWERING)

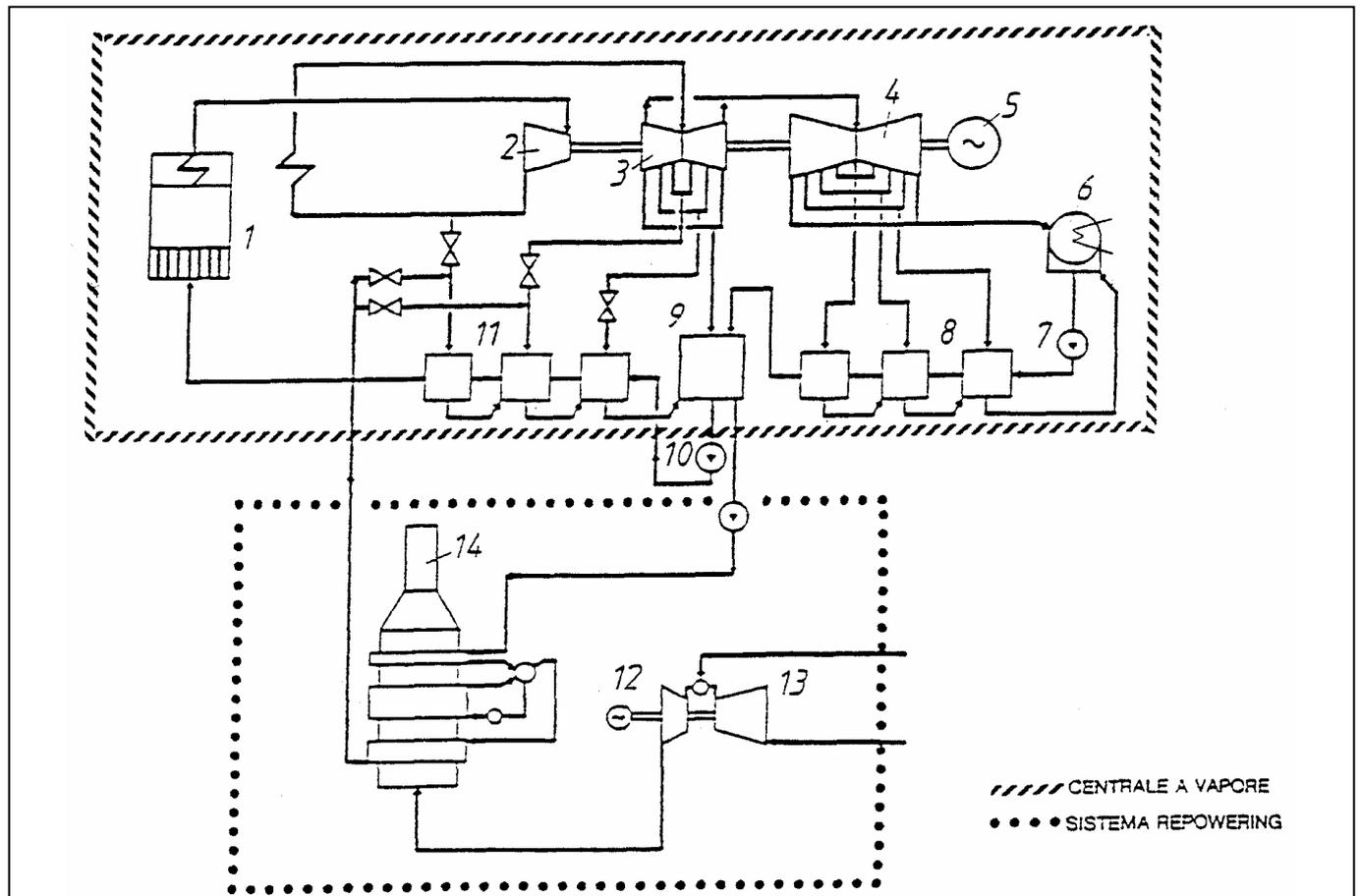


Fig. 13 - Feedwater Repowering: ripotenziamento con preriscaldamento dell'acqua di alimento
 1 generatore di vapore; 2 corpo di alta pressione della turbina a vapore; 3 corpo di media pressione a doppio flusso; 4 corpo di bassa pressione a doppio flusso; 5 alternatore; 6 condensatore; 7 pompa di estrazione; 8 rigeneratori di bassa pressione; 9 degasatore; 10 pompa di alimento; 11 rigeneratori di alta pressione; 12 alternatore; 13 gruppo turbogas; 14 caldaia a recupero

GRUPPO A VAPORE

Potenza netta [MW]	150	225	2 • 305	630
Rendimento netto	0,38	0,385	0,398	0,403

GRUPPO A GAS

Potenza netta [MW]	26	37,5	116	116
Rendimento netto	0,285	0,314	0,327	0,327

GRUPPO COMBINATO

Potenza netta [MW]	175	262	725	745
Incremento della potenza (%)	16,6	16,4	18,8	18,2
Rendimento netto	0,386	0,393	0,406	0,411
Incremento del rendimento (%)	1,58	2,01	2,01	1,98

Fig. 14 - Esempi di Feedwater Repowering (Turbogas Nuovo Pignone)

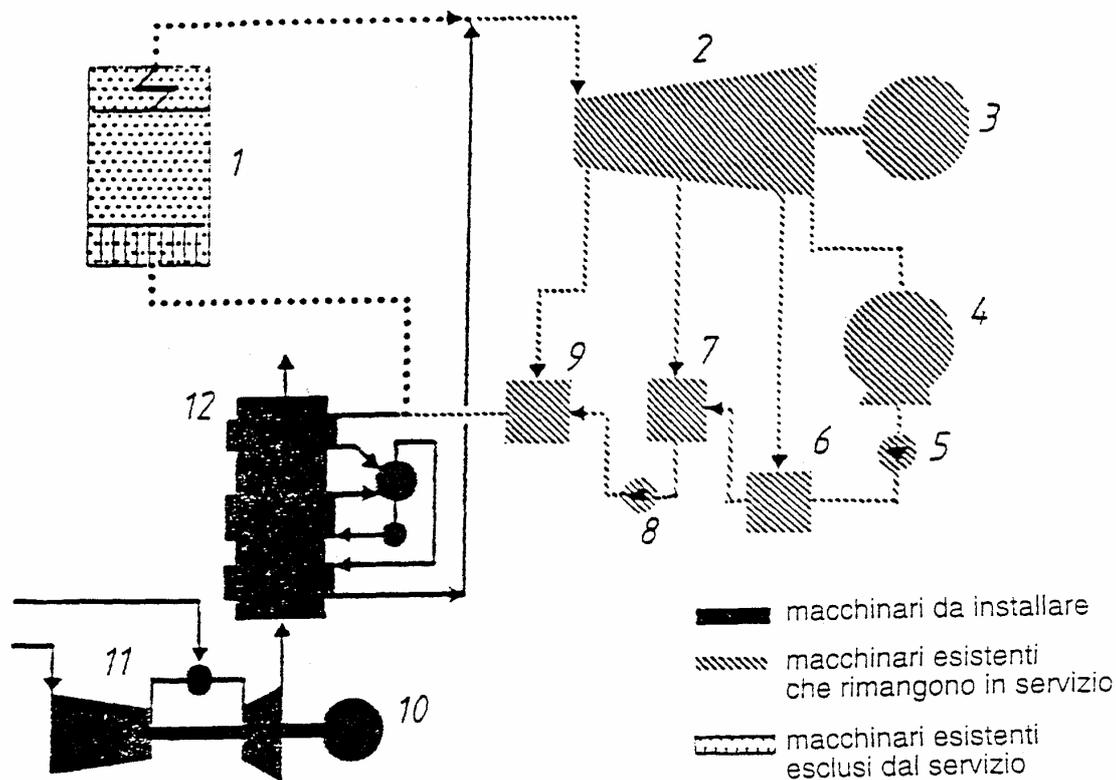


Fig. 15 - Heat Recovery Repowering: ripotenziamento con recupero dei gas di scarico del turbogas tramite HRSG

1 generatore di vapore; 2 turbina a vapore; 3 alternatore; 4 condensatore; 5 pompa di estrazione; 6 rigeneratore di bassa pressione; 7 degasatore; 8 pompa di alimento; 9 rigeneratore di alta pressione; 10 alternatore; 11 gruppo turbogas; 12 caldaia a recupero (HRSG)

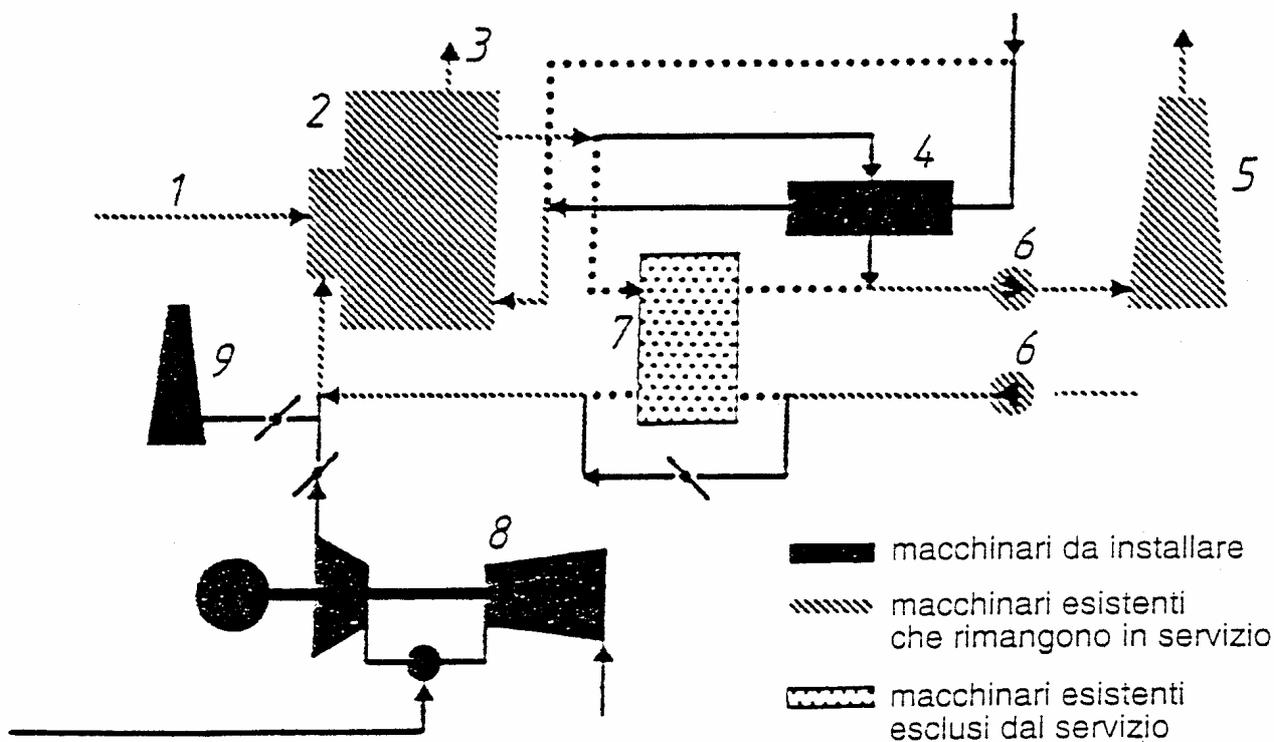
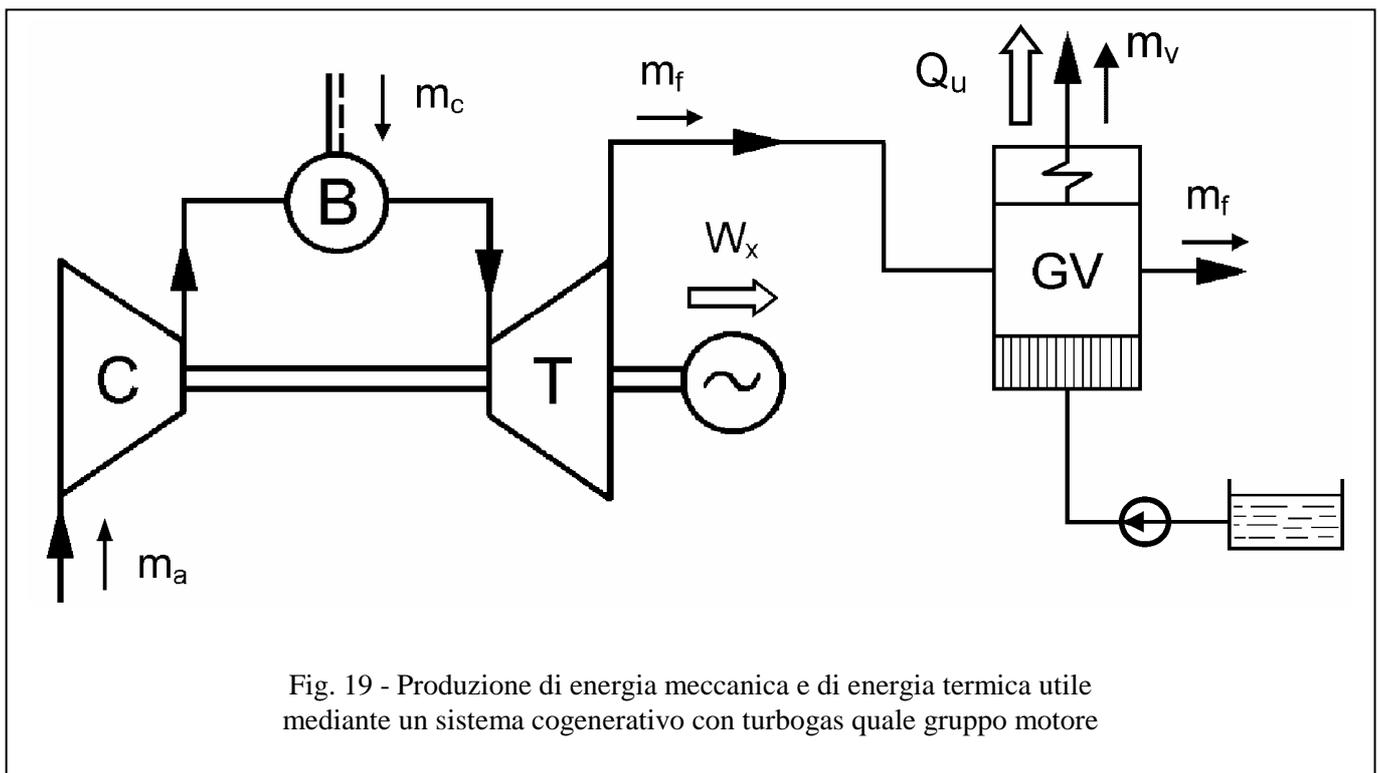
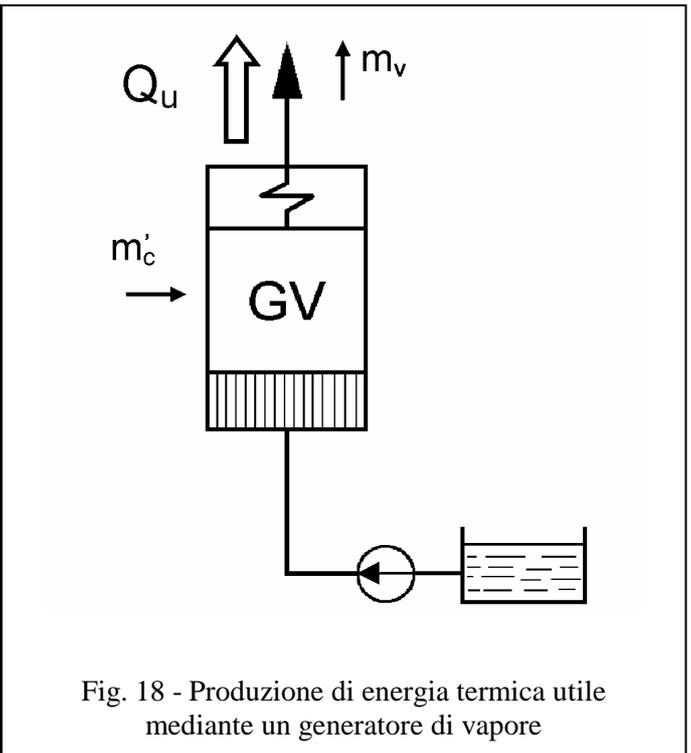
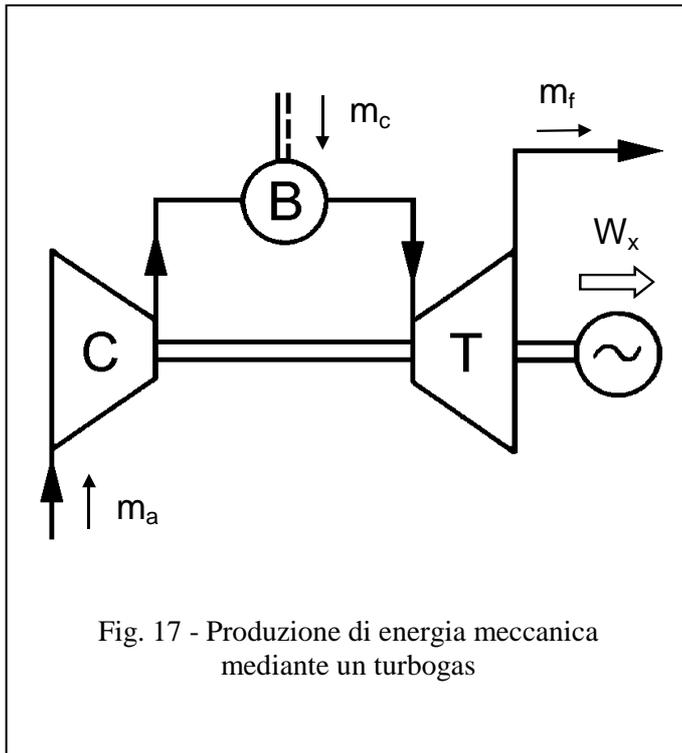


Fig. 16 - Boiler Repowering: ripotenziamento con postcombustione nel generatore di vapore (boiler)
 1 ingresso combustibile; 2 generatore di vapore; 3 alla turbina a vapore; 4 economizzatore; 5 camino; 6 ventilatore; 7 preriscaldatore d'aria; 8 gruppo turbogas; 9 camino di by-pass

SISTEMI COGENERATIVI (CHP - COMBINED HEAT AND POWER)



Indice di utilizzazione globale del combustibile:

$$U = \frac{W_x + Q_u}{m_c H_i} = U_{m/e} + U_t$$

Indice di utilizzazione meccanica o elettrica del combustibile:

$$U_{m/e} = \frac{W_x}{m_c H_i}$$

Indice di utilizzazione termica del combustibile:

$$U_t = \frac{Q_u}{m_c H_i}$$

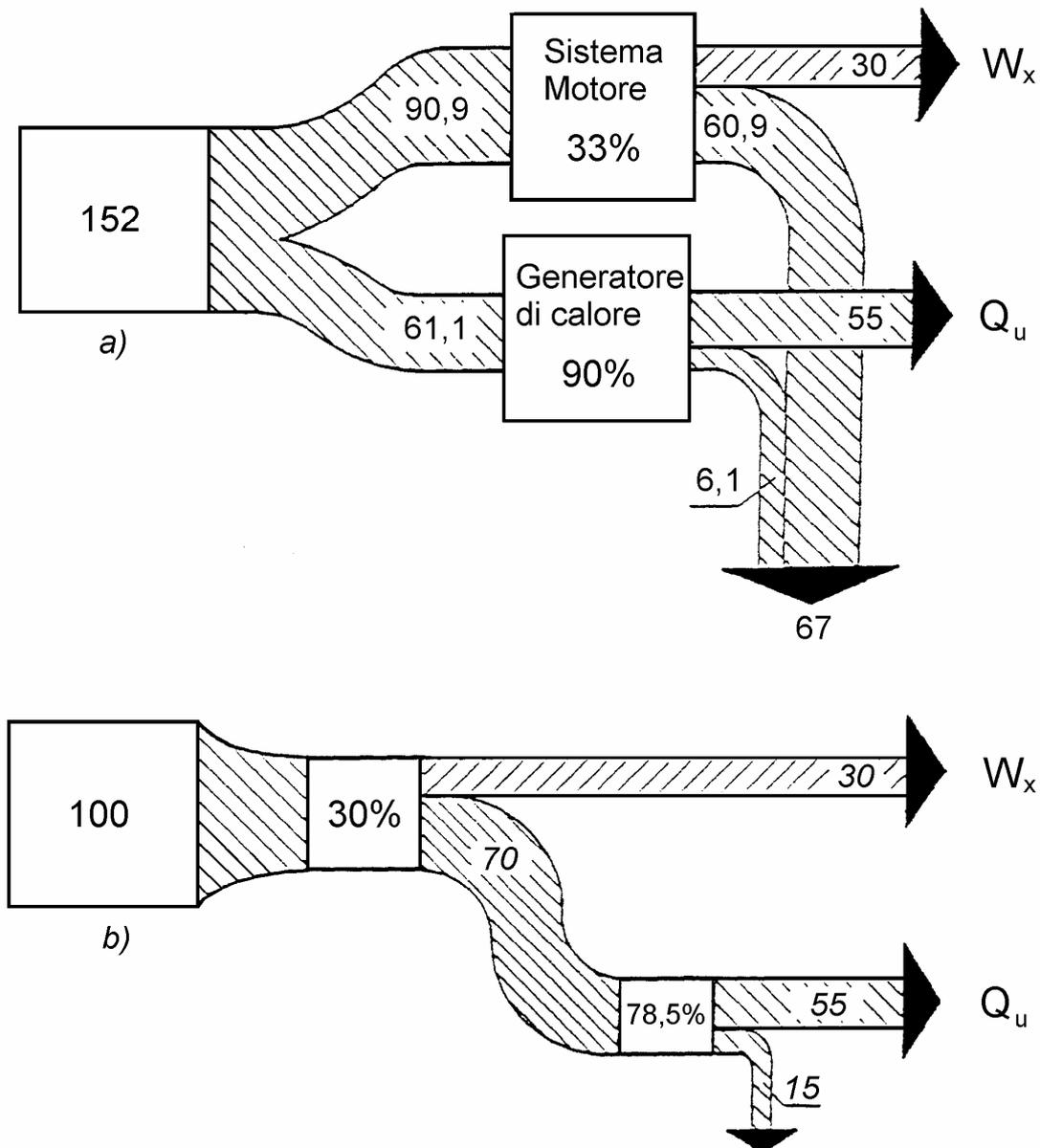


Fig. 20 - Bilanci d'energia per un sistema convenzionale (a) e per un sistema cogenerativo (b) per la produzione di energia meccanica e di energia termica utile

Indice meccanico o elettrico:

$$I_{m/e} = W_x / Q_u$$

Rapporto di cogenerazione:

$$\lambda = Q_u / W_x = 1 / I_{m/e}$$

PRODUTTORE	Produzione totale di energia elettrica		Produzione di energia elettrica mediante sistemi di cogenerazione	
	TWh	%	TWh	%
ENEL	170,2	84	-	-
Aziende Municipali	7,4	4	0,5	4
Autoproduttori industriali	24,9	12	13,2	96
Altre imprese minori	1,0	-	-	-
TOTALE	203,5	100	13,7	100

Fig. 21 - Produzione di energia elettrica in Italia in un anno di riferimento

INDUSTRIE	GWh	%
Chimiche	7812	59,2
Petrolifere	1448	11,0
Cartarie	1514	11,5
Siderurgiche	646	4,9
Tessili	567	4,3
Alimentari	561	4,3
Altre	643	4,8
TOTALE	13191	100

Fig. 22 - Produzione di energia elettrica in Italia da impianti di cogenerazione in un anno di riferimento

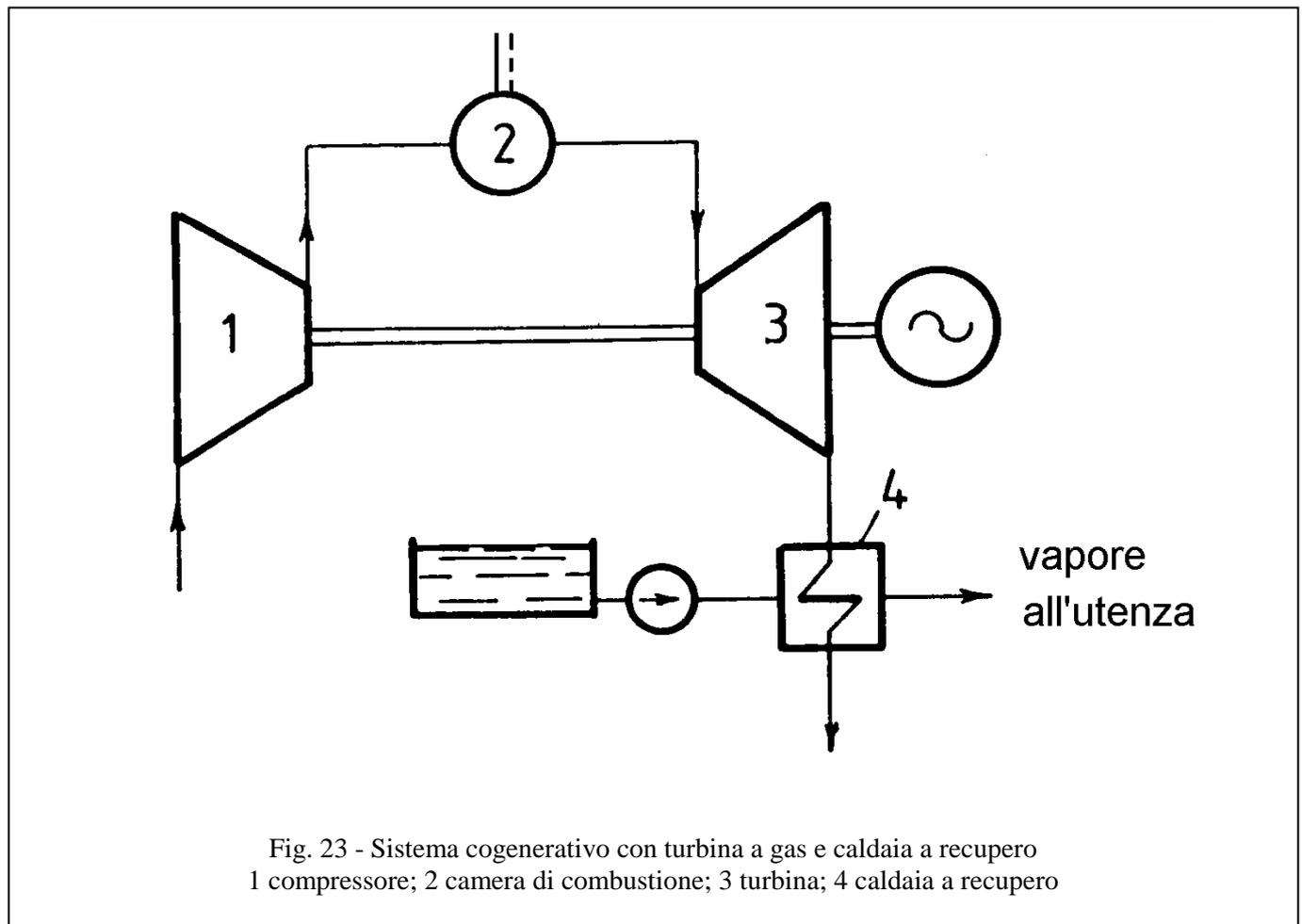
A parità di Indice di utilizzazione globale del combustibile U , l'indice meccanico o elettrico è tanto minore quanto più piccolo è $U_{m/e}$.

Supponendo ad esempio $U = 0,85$ risulta:

$U_{m/e}$	Sistema di conversione dell'energia	$\lambda = 1/I_{m/e}$	$I_{m/e}$
0,42	motore alternativo a c.i. ad accensione per compressione	1	1
0,28	turbogas	2	$1/2 = 0,50$
0,21	impianto a vapore con elevata contropressione (1)	3	$1/3 = 0,33$

(1) Di questo tipo è il primo impianto italiano di cogenerazione per teleriscaldamento di aree urbane, realizzato nella città di Brescia. Altri impianti analoghi (o alimentati con spillamenti da centrali termoelettriche) sono stati progettati o si trovano in corso di costruzione.

SISTEMI DI COGENERAZIONE CON TURBINE A GAS



SISTEMI DI COGENERAZIONE CON TURBINE A VAPORE

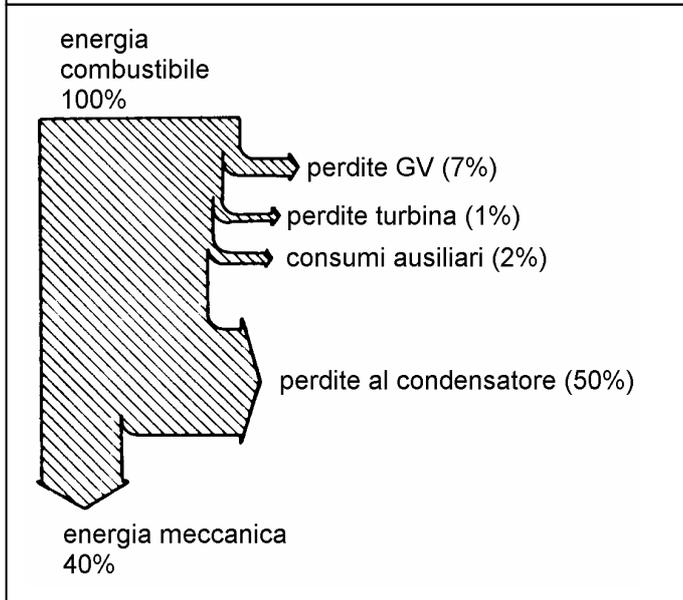
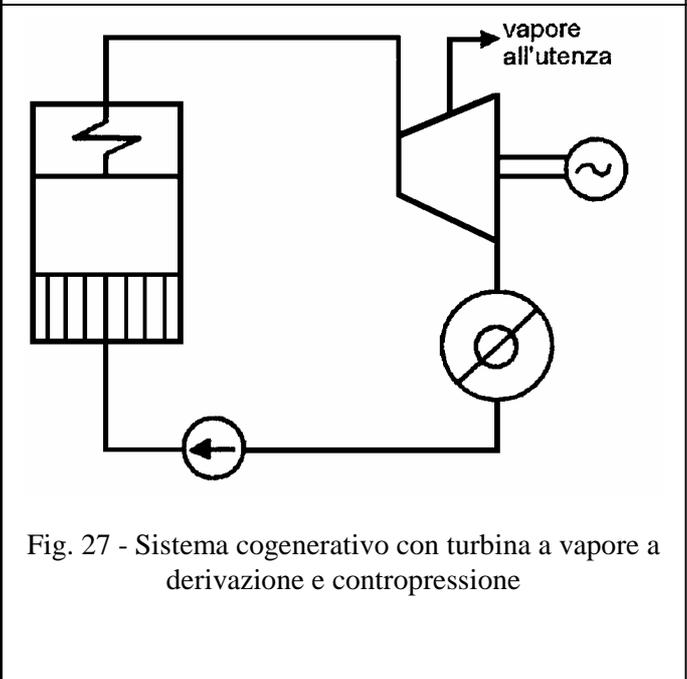
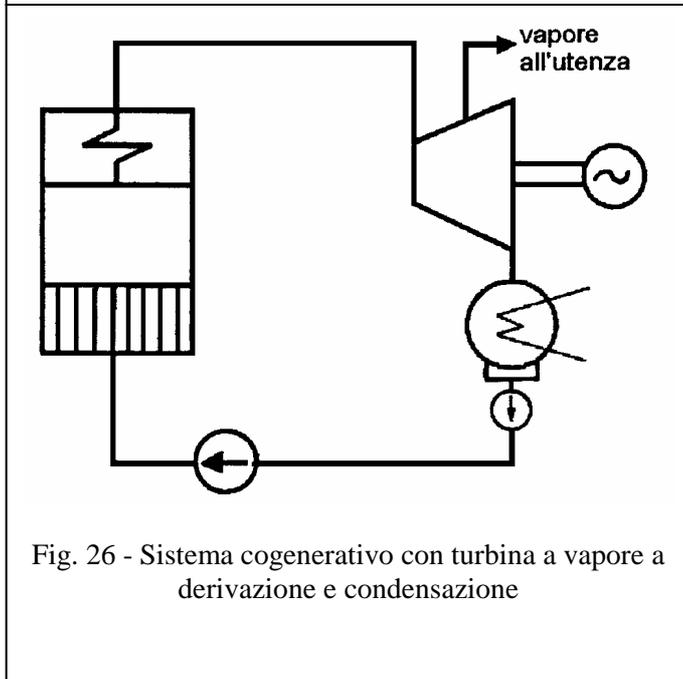
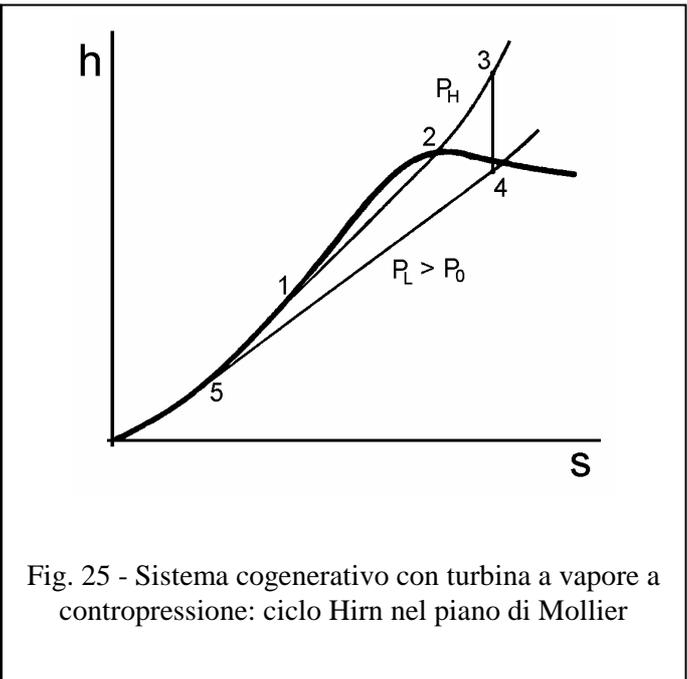
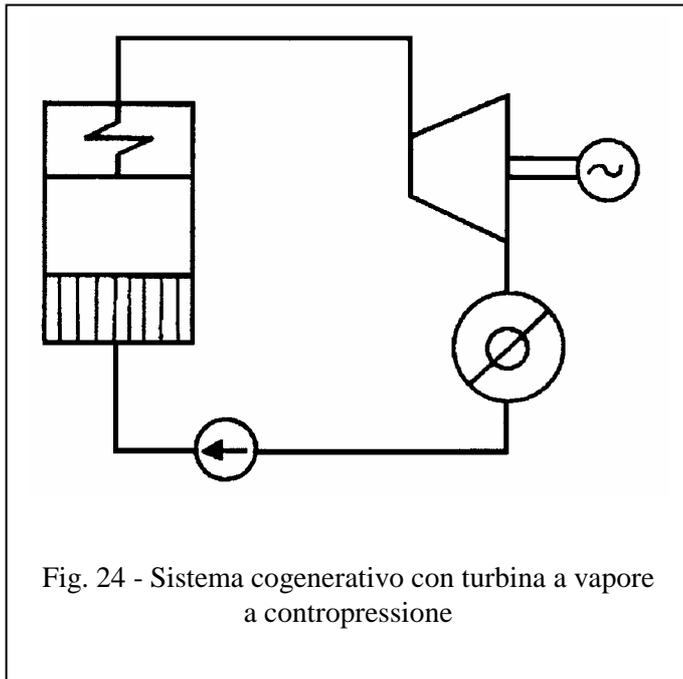


Fig. 28 - Diagramma di Sankey relativo al bilancio di energia per un gruppo termoelettrico di elevata potenza

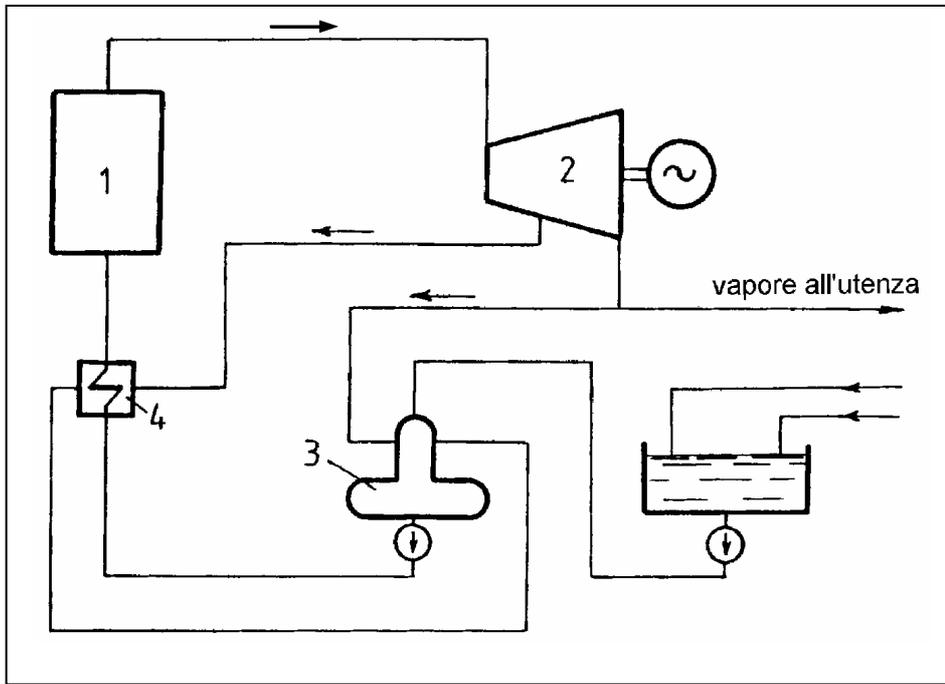


Fig. 29 - Sistema cogenerativo con turbina a vapore a contropressione

1 generatore di vapore; 2 turbina a vapore; 3 degasatore; 4 rigeneratore

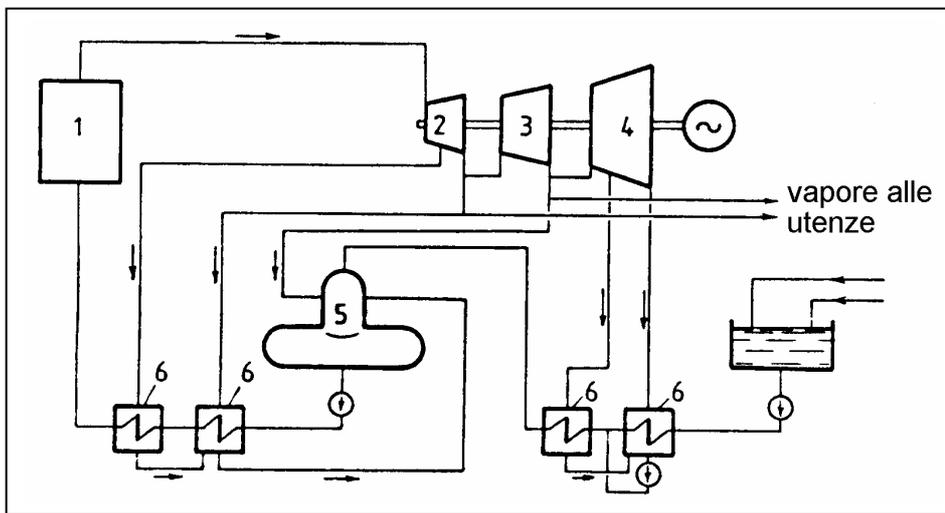


Fig. 30 - Sistema cogenerativo con turbina a vapore a derivazione e contropressione

1 generatore di vapore; 2 turbina a vapore alta pressione; 3 turbina a vapore media pressione; 4 turbina a vapore bassa pressione; 5 degasatore; 6 rigeneratore

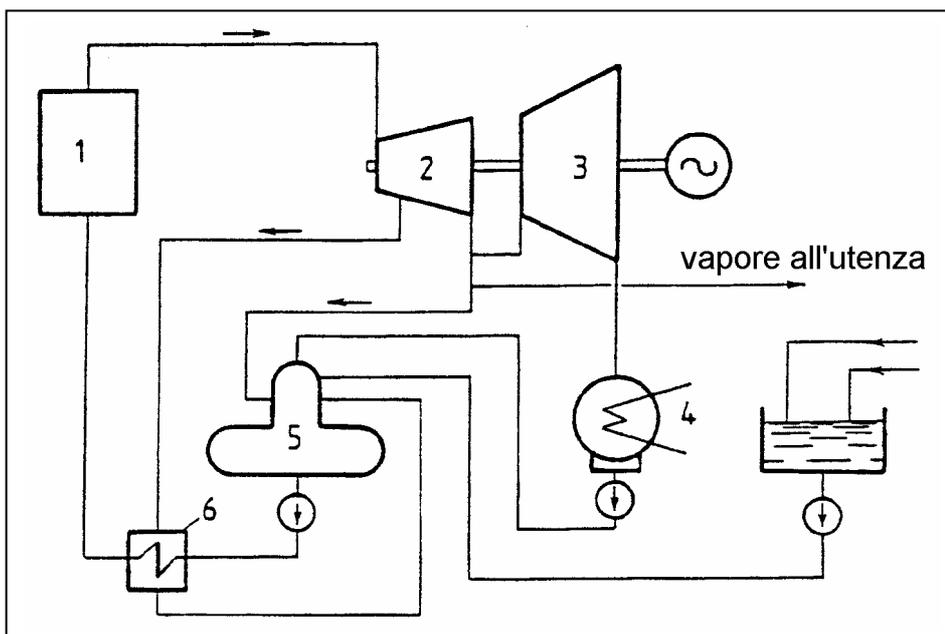


Fig. 31 - Sistema cogenerativo con turbina a vapore a derivazione e condensazione

1 generatore di vapore; 2 turbina a vapore alta pressione; 3 turbina a vapore bassa pressione; 4 condensatore; 5 degasatore; 6 rigeneratore

SISTEMI DI COGENERAZIONE CON IMPIANTI COMBINATI GAS/VAPORE

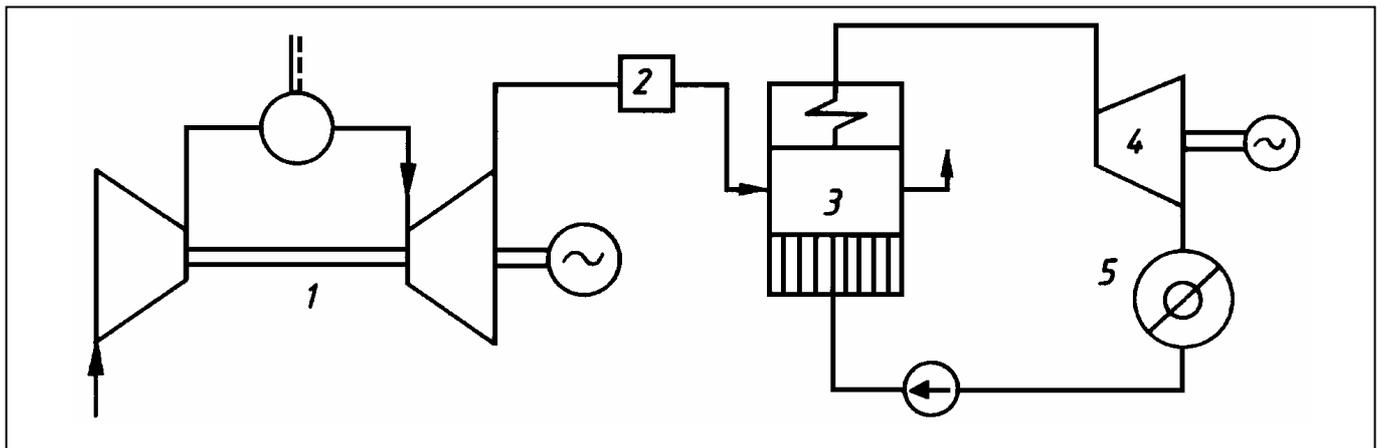


Fig. 32 - Sistema combinato gas/vapore (fired) per cogenerazione con turbina a vapore a controcompressione
1 turbogas; 2 postbruciatore; 3 caldaia a recupero; 4 turbina a vapore a controcompressione; 5 utilizzatore del vapore

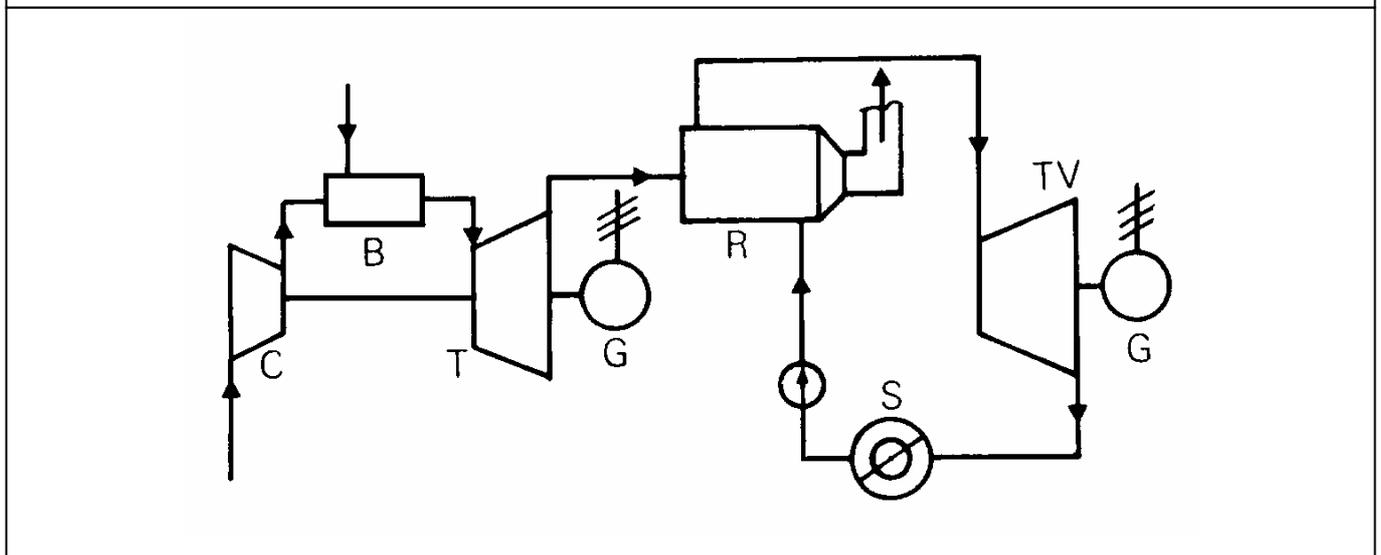


Fig. 33 - Cogenerazione con sistema combinato gas/vapore (unfired) con turbina a vapore a controcompressione

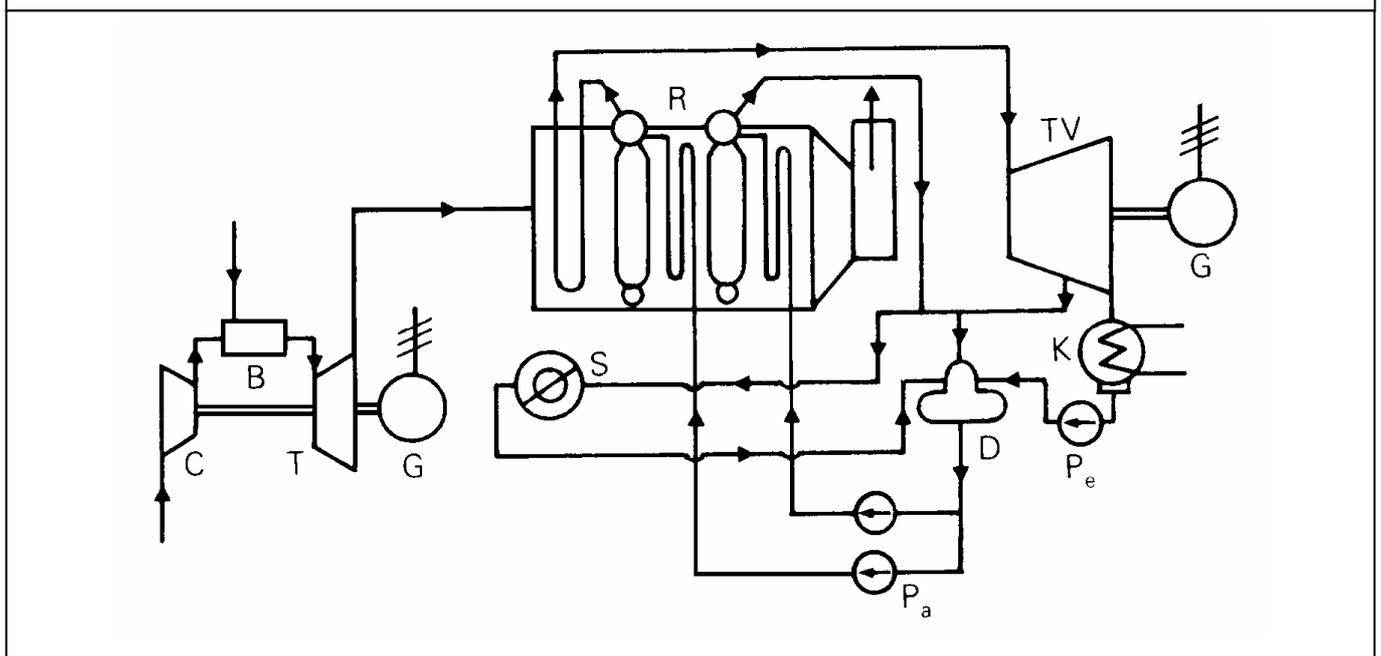


Fig. 34 - Cogenerazione con sistema combinato gas/vapore con turbina a vapore a derivazione e condensazione

SISTEMI DI COGENERAZIONE CON MOTORI ALTERNATIVI A COMBUSTIONE INTERNA

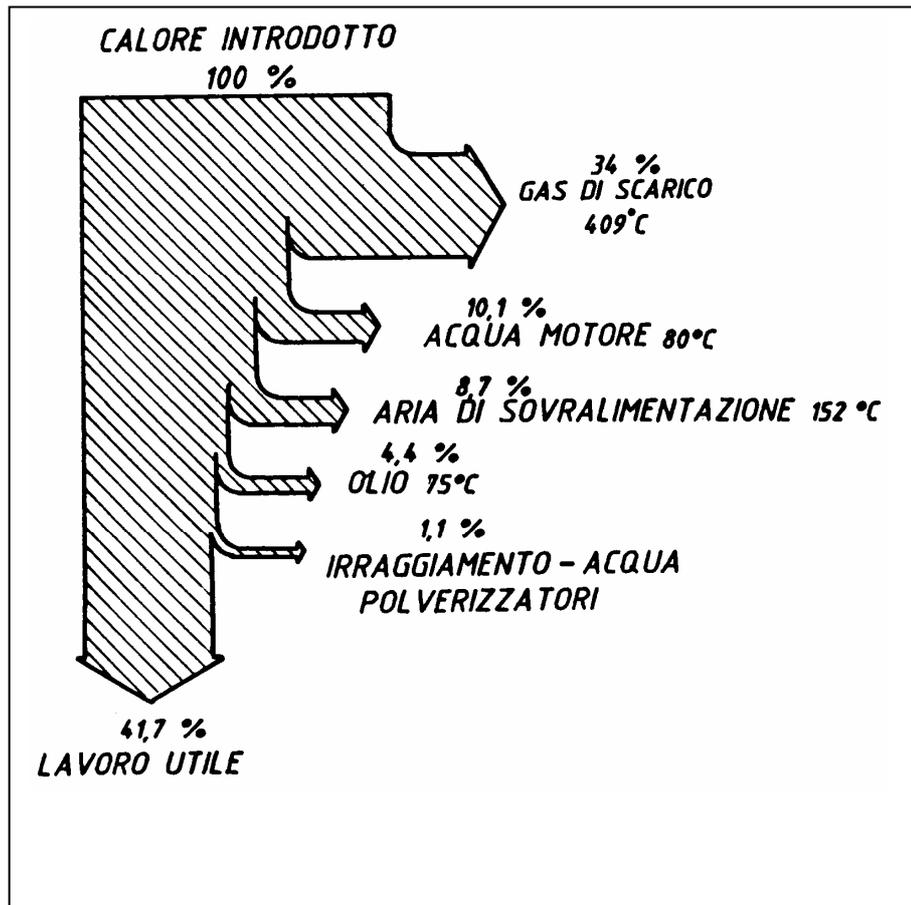
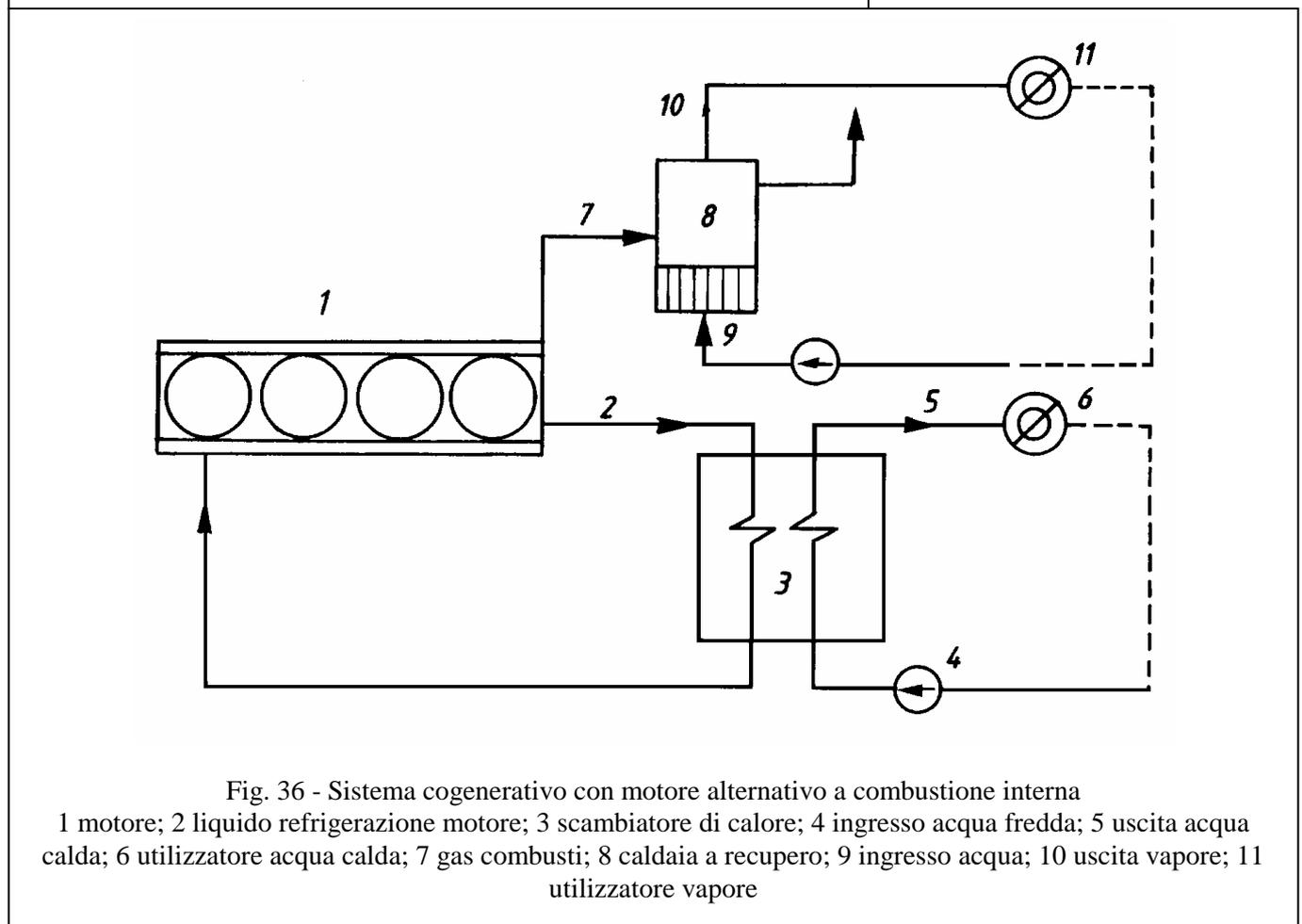


Fig. 35 - Diagramma di Sankey relativo al bilancio di energia a pieno carico per un motore a combustione interna ad accensione per compressione a 4 tempi sovralimentato



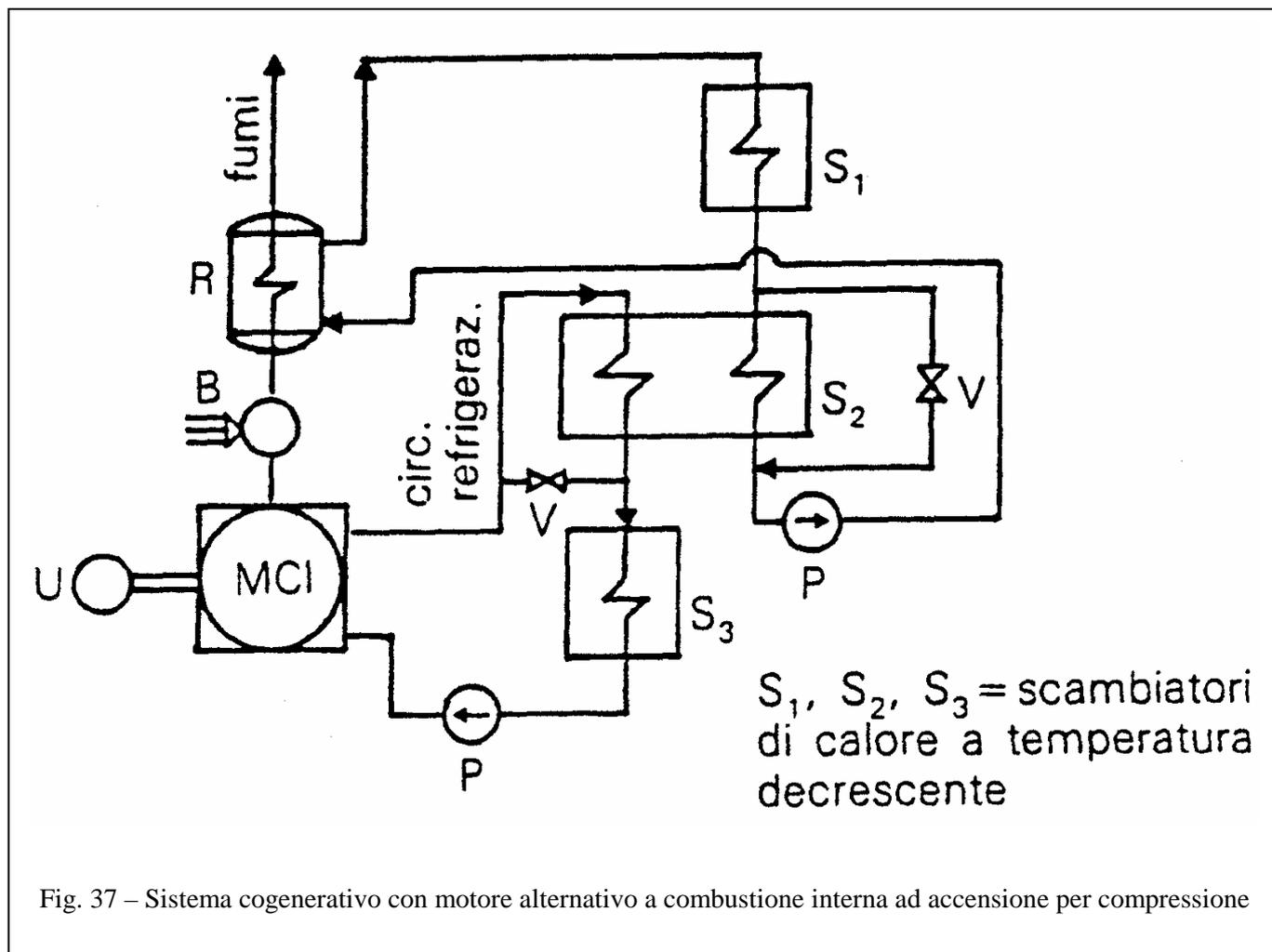


Fig. 37 – Sistema cogenerativo con motore alternativo a combustione interna ad accensione per compressione

	Chimica	Carta	Petrochimica	Alimentare	Tessile	Ceramica	Mattoni	Motoristica	Legname	Cemento	Riscaldamento	Servizi
TG	•	•	•	•	•			•	•	•	•	•
TG (1)						•	•		•			
TV contropressione	•	•		•								
Sistemi Combinati Gas/Vapore	•	•						•			•	
MCI	•			•	•						•	•
MCI (1)						•	•					

(1) Utilizzazione diretta dei prodotti della combustione

Fig. 38 - Sistemi cogenerativi impiegati nelle diverse industrie manifatturiere e dei servizi

TG	Vasti campi di applicazione Elevata affidabilità Calore a temperatura elevata Potenza da 0,5 MW a 200 MW Gas di scarico con ossigeno	Limitazioni sul combustibile Durata non elevata
TV	Elevati valori di U Elevata affidabilità Utilizza ogni combustibile Lunga durata Vasti campi di potenza	Basso valore di W_x/Q_u Costo elevato Avviamento lento
MCI	Elevato valore di W_x/Q_u Elevato rendimento Costo non elevato Lunga durata Flessibilità	Elevati costi di manutenzione Calore a temperatura non elevata Calore non concentrato in un'unica fonte

Fig. 39 - Caratteristiche dei sistemi cogenerativi basati sui diversi gruppi di potenza

Impianto	Energia totale prodotta			SISTEMA COGENERATIVO		SISTEMA CONVENZIONALE		IR (%)
				U	Energia spesa	Rendimento	Energia spesa	
TG	W_x	=	26,5	0,81	100,00	0,33	80,3	29,0
	(Indice elettrico = 0,486)							
	Q_u	=	54,5					
	Totale	=	81,0				140,9	
TG (1)	W_x	=	17,0	0,87	100,00	0,33	51,5	22,7
	(Indice elettrico = 0,243)							
	Q_u	=	70,0					
	Totale	=	87,0				129,3	
TV	W_x	=	15,0	0,90	100,00	0,33	45,5	22,4
	(Indice elettrico = 0,200)							
	Q_u	=	75,0					
	Totale	=	90,0				128,8	
MCI	W_x	=	36,0	0,70	100,00	0,33	109,1	31,9
	(Indice elettrico = 1,059)							
	Q_u	=	34,0					
	Totale	=	70,0				146,9	

(1) con postcombustione

Fig. 40 - Indici di risparmio di energia primaria relativi ai diversi sistemi cogenerativi

TELERISCALDAMENTO URBANO (IMPIANTO DI BRESCIA)

La centrale di teleriscaldamento è costituita da un impianto a vapore con turbina Ansaldo a contropressione con scarico a condensatore caldo (scambiatore di calore di alimentazione della rete di teleriscaldamento) e generatore di vapore Breda:

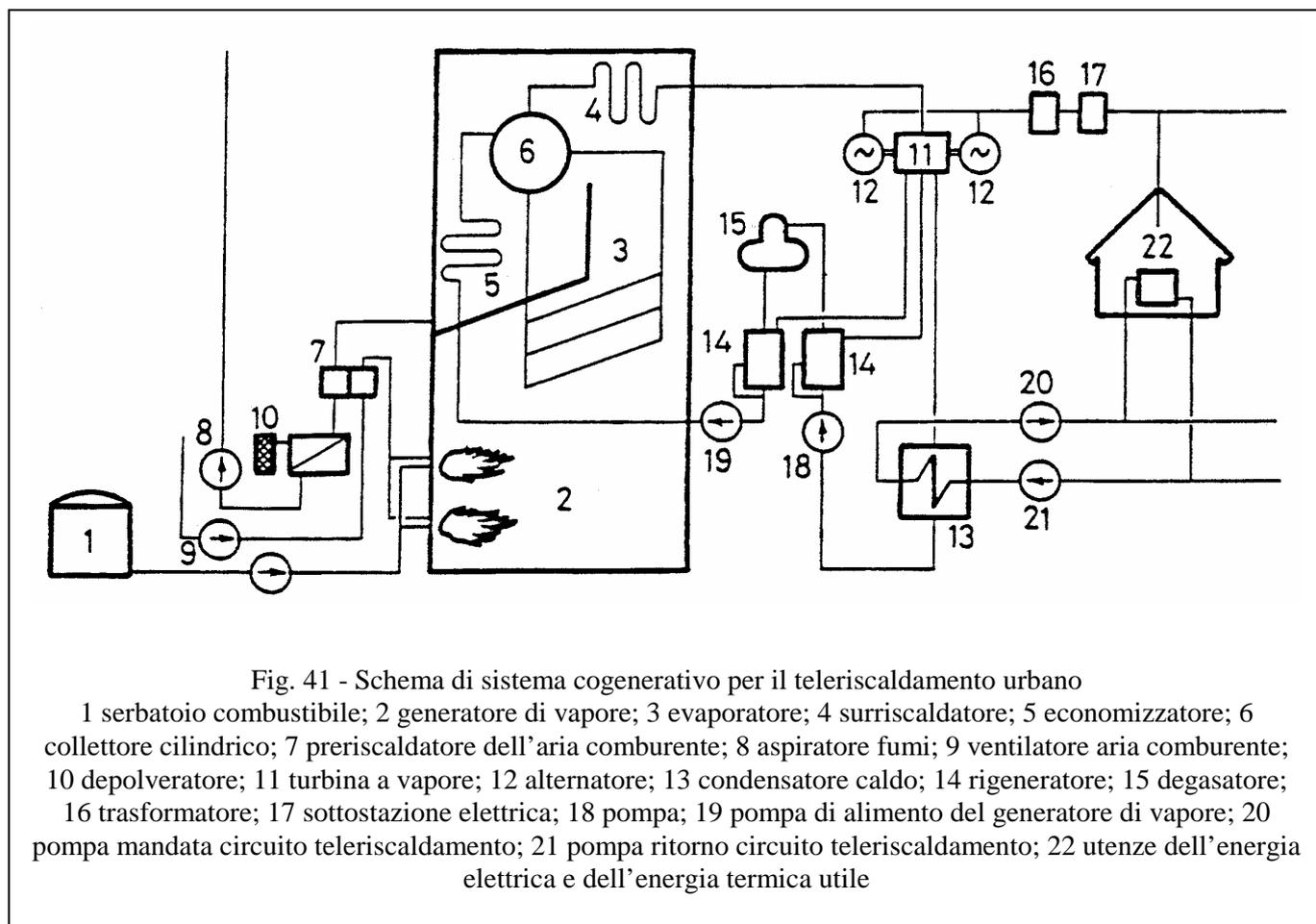
Potenza elettrica	30 MW
Potenza termica utile	$75 \cdot 10^6$ kcal/h

Generatore di vapore

Pressione vapore surriscaldato	99 bar
Temperatura vapore surriscaldato	515 °C
Portata di vapore a carico termico massimo	175 t/h
Rendimento del generatore di vapore	94 %

Generatore elettrico (alternatore trifase)

Potenza	39500 kVA
Tensione	15000 V



CDU 620.4:001.4

Norma italiana

Febbraio 1987

CTI	Sistemi per processi di cogenerazione Definizioni e classificazione	UNI 8887
------------	--	---------------------

Systems for cogeneration processes — Definitions and classification

1. Generalità

1.1. Scopo

Lo scopo della presente norma è quello di:

- definire e classificare i diversi sistemi di cogenerazione;
- introdurre specifiche definizioni per componenti caratteristici del sistema nonché i limiti (anche convenzionali) nella relativa catena di interconnessione;
- definire indici e parametri caratteristici atti ad individuare la qualità e le prestazioni in termini energetici per quanto oggetto della presente norma;
- definire le prestazioni in condizioni nominali e in altre condizioni significative dei sistemi di cogenerazione.

La presente norma non considera gli aspetti connessi a quanto segue in quanto possono essere oggetto di separate successive norme:

- capitolati per l'offerta e l'ordinazione;
- costruzione, inclusi i materiali impiegati;
- prove di collaudo e di accettazione;
- garanzie;
- criteri di valutazione tecnico/economica degli impianti.

1.2. Campo di applicazione

La presente norma si applica ad ogni sistema di cogenerazione indipendentemente:

- dalla sorgente energetica;
- dall'entità dei flussi energetici e dei loro rapporti;
- dai settori di appartenenza dei produttori e degli utilizzatori (industriale, servizi, residenziale, agricolo, ecc.).

1.3. Grandezze

Denominazione	Simbolo	Unità di misura
Consumo specifico convenzionale per produzione di energia meccanica/elettrica	CS_{ME}	—
Consumo specifico convenzionale per produzione di calore	CS_Q	—
Indice (meccanico) elettrico caratteristico	I	—
Indice di risparmio di energia primaria	IR	—
Numero delle sorgenti energetiche che alimentano il sistema	j	—
Numero degli utilizzatori termici di calore a temperatura medio/alta presenti nel sistema	m	—
Numero degli utilizzatori termici a bassa temperatura presenti nel sistema	n	—
Numero degli utilizzatori di potenza meccanica/elettrica presenti nel sistema	o	—
Numero dei pozzi di calore presenti nel sistema	p	—
Potenza resa dall'iesima fonte energetica, ivi inclusi gli assorbimenti di potenza dovuti alla circolazione dei fluidi vettori del calore; per combustibili, si assume convenzionalmente pari al prodotto del potere calorifico inferiore (riferito alle condizioni nominali di 15 °C) per la portata del combustibile stesso	PF_i	kW
Equivalente meccanico della potenza PF_i fornita dall'iesima fonte energetica	PFM_i	kW
Potenza meccanica al giunto verso la macchina operatrice dell'iesimo utilizzatore meccanico, o potenza elettrica ai morsetti di uscita verso l'iesimo utilizzatore elettrico (al netto di tutti gli assorbimenti interni)	PME_i	kW
Potenza meccanica ottenibile idealmente dalla potenza termica Q_i	PQ_i	kW
Potenza termica generica, fornita dall'iesima fonte energetica o resa ad un utilizzatore termico	Q_i	kW

(segue)

Le norme UNI sono revisionate, quando necessario, con la pubblicazione sia di nuove edizioni sia di fogli di aggiornamento. È importante pertanto che gli utenti delle stesse si accertino di essere in possesso dell'ultima edizione o foglio di aggiornamento.

pag. 2 UNI 8887

Denominazione	Simbolo	Unità di misura
Potenza termica ceduta all'iesimo pozzo di calore	QD_i	kW
Potenza termica resa alle flange dell'iesimo utilizzatore termico a temperatura medio/alta, al netto delle perdite termiche connesse alla trasmissione	QUA_i	kW
Potenza termica resa alle flange dell'iesimo utilizzatore termico a bassa temperatura, al netto delle perdite termiche connesse alla trasmissione	QUB_i	kW
Temperatura ambiente di riferimento	T_A	°C
Temperatura cui è disponibile la potenza termica Q_i	TQ_i	°C
Rendimento di I principio	η_I	—
Rendimento di II principio	η_{II}	—
Rendimento per produzione di energia meccanica/elettrica	η_{ME}	—
Indice di produzione termica	η_Q	—
Rendimento η_i dell'ipotetico processo convenzionale di generazione di potenza meccanica elettrica	η_p^*	—
Rendimento η_i dell'ipotetico processo convenzionale di generazione di calore	η_Q^*	—

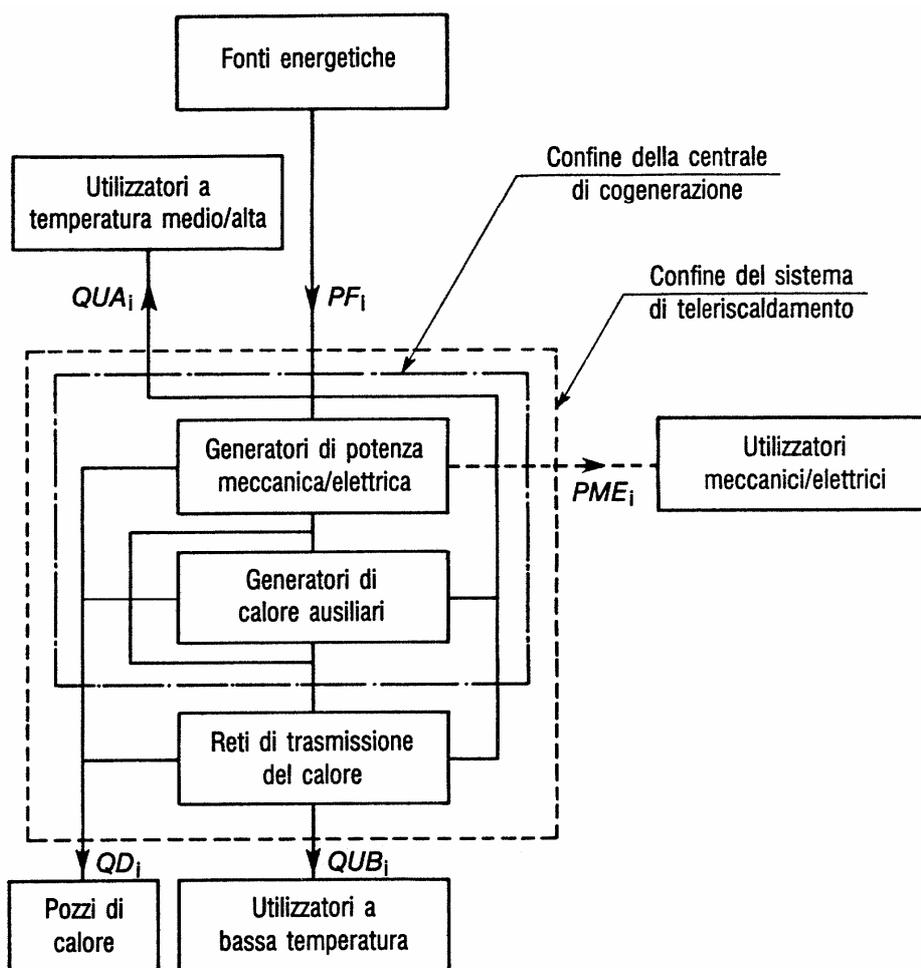


Fig. 42 - Schema completo delle possibili interconnessioni energetiche

4. Condizioni nominali, campo di funzionamento, indici e parametri caratteristici

Nelle definizioni si fa riferimento ai "sistemi di teleriscaldamento a cogenerazione". Analoghi parametri possono essere definiti per i "sistemi di cogenerazione", depurando i bilanci energetici dei termini relativi alle reti di distribuzione del calore (consumi dei circolatori, perdite termiche, ecc.).

Di seguito vengono definiti alcuni indici caratteristici e condizioni tipiche di funzionamento per i sopradetti sistemi atti ad evidenziarne il comportamento energetico.

Tali definizioni sono riportate in due gruppi:

- definizioni atte ad individuare i campi di possibile funzionamento del sistema e i rapporti caratteristici tra i prodotti energetici (calore ed energia meccanica/elettrica);
- indici esprimenti il comportamento energetico in condizioni significative di esercizio.

4.1. Condizioni nominali

Si definiscono condizioni nominali di un sistema di cogenerazione quelle corrispondenti all'esercizio con il massimo valore della/e potenza/e introducibile nel sistema, in funzionamento continuo (per un periodo specificato).

Qualora il sistema abbia diverse modalità di esercizio, sia in relazione al tipo di combustibile e/o relativa combinazione sia in dipendenza alla introduzione ausiliaria di potenza (per esempio: post-bruciatore), si definiscono più condizioni nominali, ognuna relativa ad una modalità di funzionamento continuativo, caratterizzata dal massimo flusso energetico entrante in ogni sezione. Per quanto attiene la centrale di cogenerazione, le condizioni nominali sono valutate nelle seguenti situazioni ambientali di riferimento:

- temperatura = 15 °C
- pressione = 101325 Pa
- umidità relativa = 50%.

Nel caso in cui le prestazioni dei vari componenti del sistema siano note in condizioni ambientali diverse da quelle di riferimento, esse potranno essere ricondotte a tali condizioni, applicando le normative esistenti.

Le dispersioni termiche delle reti di distribuzione del calore nelle condizioni nominali sono pure da valutarsi in accordo con le normative esistenti.

Nelle definizioni delle condizioni nominali dovranno inoltre essere chiaramente precisate:

- le caratteristiche del/i combustibile/i impiegato/i (anche degli eventuali additivi) e del/i comburente/i (specificando l'eccesso d'aria);
- la composizione chimica e le condizioni termodinamiche (temperatura, pressione e, se appropriato, il titolo) dei fluidi o solidi entranti e uscenti dal sistema, siano essi utilizzatori termici o addetti alla dispersione del calore inutilizzato.

4.2. Campo di funzionamento

Agli effetti delle possibilità di funzionamento i sistemi di cogenerazione si ripartiscono come segue:

- con possibilità di funzionamento anche di sola energia meccanica/elettrica;
- con possibilità di produzione anche di sola energia meccanica/elettrica;
- con possibilità di produzione anche di solo calore.

Conseguentemente si definiscono gli indici seguenti.

4.2.1. Per sistemi con possibilità di funzionamento solo in cogenerazione

$$\text{Indice di minimo carico termico in condizioni di potenza meccanica/elettrica nominale} = \frac{\text{Minimo valore della potenza termica}^{6), 7) \text{ richiesto per funzionamento alla potenza meccanica/elettrica nominale}}{\text{Potenza termica in condizioni nominali}^{6), 7)}$$

$$\text{Indice di minima potenza meccanica/elettrica in condizioni di carico termico nominale} = \frac{\text{Minimo valore della potenza meccanica/elettrica}^{8) \text{ richiesto per funzionamento alla potenza termica nominale}}{\text{Potenza meccanica/elettrica}^{6) \text{ in condizioni nominali}}$$

4.2.2. Per sistemi con possibilità di produzione anche di sola energia meccanica/elettrica

$$\text{Indice di potenza meccanica/elettrica in funzionamento con sola produzione di potenza meccanica/elettrica} = \frac{\text{Massimo valore della potenza meccanica/elettrica}^{8) \text{ producibile con continuità senza contemporanea generazione di calore utile}}{\text{Valore della potenza meccanica/elettrica}^{8) \text{ in condizioni nominali}}$$

(segue)

6) Per condizioni termodinamiche dei fluidi o solidi entranti ed uscenti dal sistema uguali alle condizioni nominali.

7) La potenza termica in presenza di vari utilizzatori termici è la somma delle potenze termiche rese ai vari utilizzatori, al netto di tutte le perdite termiche.

8) Al netto degli eventuali assorbimenti interni per tutti gli ausiliari necessari per il funzionamento del sistema.

4.2.3. Per sistemi con possibilità di produzione anche di solo calore

$$\text{Indice di potenza termica in funzionamento con sola produzione di calore} = \frac{\text{Massimo valore del calore utile producibile senza contemporanea generazione meccanica/elettrica}^{9), 10)}}{\text{Potenza termica in condizioni nominali}^{9), 10)}}$$

Per una identificazione delle prestazioni di un sistema di cogenerazione, è utile definire i vari indici e parametri di funzionamento nelle seguenti condizioni di esercizio:

- nominali del sistema (punto N di fig. 20);
- in corrispondenza del funzionamento di cui agli indici definiti in 4.2.1, 4.2.2. e 4.2.3 (punti A₁, A₂, A₃ e A₄ di fig. 20);
- per le seguenti condizioni a carico parziale:
 - al 25,50 e 75% della potenza meccanica/elettrica nominale, con funzionamento alla massima potenza termica producibile dal sistema (punti B₁, B₂ e B₃ di fig. 20);
 - al 25,50 e 75% della potenza termica nominale, con funzionamento alla massima potenza/elettrica producibile dal sistema (punti C₁, C₂ e C₃ di fig. 20);
 - al 25,50 e 75% dei valori nominali di entrambe le potenze meccanica/elettrica e termica (punti D₁, D₂ e D₃ di fig. 20).

Nota: La fig.20 richiamata sopra è sostituita dalla successiva fig.43.

9) Vedere nota 6 alla pagina precedente.

10) Vedere nota 7 alla pagina precedente.

4.3. Indici e parametri caratteristici

Gli indici e i parametri considerati sono riferiti ad un funzionamento a regime che può coincidere con le condizioni nominali o con altre condizioni di funzionamento significative.

4.3.1. Rendimento di I principio (indice di resa energetica assoluta globale)

Pesa in modo uguale tutte le forme di energie (termiche, meccaniche, elettriche).

È definito come rapporto fra la somma delle potenze rese all'utenza e quella delle potenze fornite dalla/e fonte energetica:

$$\eta_I = \frac{\sum_1^o PME_i + \sum_1^m QUA_i + \sum_1^n QUB_i}{\sum_1^J PF_i}$$

Le uniche perdite sono dovute alla cessione di calore ai pozzi di calore (in pratica, all'ambiente) direttamente o tramite perdite elettriche e meccaniche.

Se definiamo: il rendimento per produzione di energia meccanica/elettrica, η_{ME} :

$$\eta_{ME} = \frac{\sum_1^o P_{ME_i}}{\sum_1^J P_{F_i}}$$

e un indice di produzione termica η_Q :

$$\eta_Q = \frac{\sum_1^m Q_{UA_i} + \sum_1^n Q_{UB_i}}{\sum_1^J P_{F_i}}$$

si ha:

$$\eta_I = \eta_{ME} + \eta_Q$$

4.3.2. Rendimento di Il principio (indice di resa energetica qualificata globale)

Si stabilisce un meccanismo di equiparazione delle diverse forme energetiche, consistente nella conversione convenzionale in lavoro meccanico di tutte le forme energetiche.

Si assume come condizione di riferimento la temperatura ambiente nominale T_A ¹¹⁾ e si ipotizza che la conversione di energia in lavoro avvenga con processi reversibili.

Pertanto, per potenze di tipo termico, si ha:

$$P_{Q_i} = Q_i \left(1 - \frac{T_A}{T_{Q_i}}\right)$$

dove P_{Q_i} è la potenza meccanica ottenibile idealmente dalla potenza termica Q_i , disponibile alla temperatura T_{Q_i} ¹²⁾.

Se la sorgente di energia non è di tipo termico, occorre stabilire un equivalente meccanico della potenza da essa fornita, che chiameremo P_{FM_i} . Nel caso di combustibile, tale equivalente è convenzionalmente assunto pari al potere calorifico inferiore¹³⁾.

Il rendimento di Il principio è dunque definito da:

$$\eta_{II} = \frac{\sum_1^o P_{ME_i} + \sum_1^m Q_{UA_i} \left(1 - \frac{T_A}{T_{Q_i}}\right) + \sum_1^n Q_{UB_i} \left(1 - \frac{T_A}{T_{Q_i}}\right)}{\sum_1^J P_{FM_i}}$$

In questo caso, le perdite sono dovute alle varie irreversibilità presenti nel sistema (fluidodinamiche, attriti, trasmissione di calore sotto differenze finite di temperatura, ecc.).

4.3.3. Consumo specifico convenzionale per produzione di energia meccanica/elettrica

È definito come rapporto fra la porzione di potenza introdotta eccedente il fabbisogno energetico di un ipotetico processo che produca con metodi convenzionali il calore richiesto da utilizzatori termici e la potenza meccanica/elettrica prodotta.

Esso vale:

$$CS_{ME} = \frac{\sum_1^J P_{F_i} - \frac{1}{\eta_Q^*} \left(\sum_1^m Q_{UA_i} + \sum_1^n Q_{UB_i} \right)}{\sum_1^o P_{ME_i}}$$

dove η_Q^* è il rendimento η_I dell'ipotetico processo convenzionale di generazione di calore, da assumersi come indicato nel prospetto V.

11) T_A è convenzionalmente pari a 15 °C.

12) Se la temperatura cui è ceduto il calore non è costante, occorre assumere un valore medio opportuno. Esso può essere correttamente valutato da bilancio entropico: $T_{Q_i} = \frac{Q_i}{\Delta S_i}$, dove ΔS_i è la variazione di entropia della sorgente di energia.

Analogha considerazione vale per la conversione convenzionale in energia meccanica/elettrica delle potenze termiche Q_{UA_i} e Q_{UB_i} , qualora esse siano fornite a temperatura variabile agli utilizzatori termici.

13) Alla temperatura nominale di riferimento di 15 °C.

4.3.4. Consumo specifico convenzionale per produzione di calore

È definito come rapporto fra la porzione di potenza introdotta eccedente il fabbisogno energetico di un ipotetico processo che produca con metodi convenzionali (non cogenerativi) la potenza meccanica/elettrica e la potenza termica prodotta. Esso vale:

$$CS_Q = \frac{\sum_1^j PF_i - \frac{1}{\eta_p^*} \sum_1^o PME_i}{\sum_1^m QUA_i + \sum_1^n QUB_i}$$

dove η_p^* è il rendimento η_i dell'ipotetico processo convenzionale di generazione dell'energia meccanica/elettrica assunto pari a 0,374¹⁴⁾.

4.3.5. Indice di risparmio di energia primaria

È definito come rapporto fra il consumo di energia primaria del processo di cogenerazione e quello di un ipotetico processo convenzionale, che produca separatamente l'energia elettrica e termica. Esso vale:

$$IR = \frac{\sum_1^j PF_i}{\frac{1}{\eta_Q^*} (\sum_1^m QUA_i + \sum_1^n QUB_i) + \frac{1}{\eta_p^*} \sum_1^o PME_i}$$

dove: η_Q^* e η_p^* hanno il significato sopra esposto.

14) In conformità a quanto enunciato dall'articolo 10 della Legge 308.

4.3.6. Indice (meccanico) elettrico caratteristico

È definito come rapporto fra la potenza meccanica/elettrica e la somma delle potenze utili (meccaniche/elettriche + termiche) prodotte dal processo di cogenerazione.

Esso vale:

$$I = \frac{\sum_1^o PME_i}{\sum_1^o PME_i + \sum_1^m QUA_i + \sum_1^n QUB_i}$$

Esso evidenzia il peso relativo della produzione di energia meccanica/elettrica nel processo.

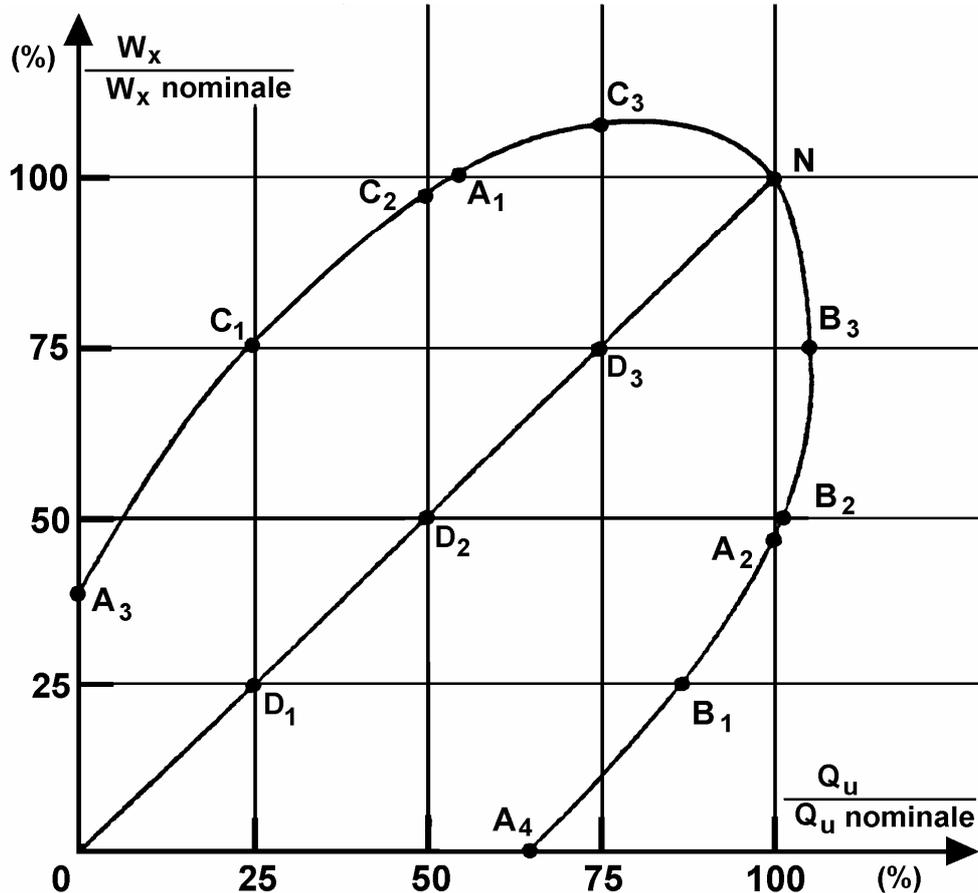


Fig. 43 - Condizioni di funzionamento di un sistema di cogenerazione

Prospetto V — Rendimenti termici “convenzionali” per generatori di calore (acqua calda, vapore) con combustione ai fini di valutazioni cogenerative

Tipo di combustibile Potenzialità PF_i kW	Gas naturale	Gasolio	Olio	Carbone
	Rendimenti convenzionali* η_i			
0 a 100	0,70 a 0,75	0,67 a 0,72	0,65 a 0,70	—
101 a 300	0,73 a 0,77	0,71 a 0,75	0,68 a 0,72	—
301 a 1 000	0,75 a 0,82	0,73 a 0,80	0,72 a 0,78	—
1 001 a 3 000	0,78 a 0,87	0,76 a 0,85	0,75 a 0,83	—
3 001 a 10 000	0,81 a 0,90	0,79 a 0,88	0,78 a 0,85	0,70 a 0,76
10 001 a 30 000	0,85 a 0,91	0,83 a 0,89	0,82 a 0,87	0,75 a 0,80
30 001 a 100 000	0,90 a 0,92	0,88 a 0,90	0,87 a 0,89	0,82 a 0,85
oltre 100 000	0,92 a 0,93	0,91 a 0,92	0,91 a 0,91	0,88 a 0,89

* I rendimenti si riferiscono a condizioni medie di esercizio (carico variabile, sporco, messa a punto, regolazione dell'impianto) e tengono conto degli assorbimenti di energia elettrica/meccanica per l'azionamento degli ausiliari propri del generatore (ventilatori, bruciatori, ecc.), secondo il coefficiente η_p^* di cui in 4.3.4. Le coppie di valori indicate per ogni tipologia di generatore sono da intendersi come rappresentative rispettivamente della situazione dell'attuale parco (1984) e come valori obiettivo da raggiungere con nuove unità.

BIBLIOGRAFIA

Acton, Caputo, “Impianti motori”, UTET, Torino, 1992.

Della Volpe, “Macchine”, Liguori Editore, 1994.

INDICE

Frontespizio	1
Sistemi combinati gas/vapore	2
Ripotenziamento delle centrali termoelettriche a vapore (Repowering)	10
Sistemi cogenerativi (CHP - Combined Heat and Power).....	12
Sistemi di cogenerazione con turbine a gas	15
Sistemi di cogenerazione con turbine a vapore	16
Sistemi di cogenerazione con impianti combinati gas/vapore.....	18
Sistemi di cogenerazione con motori alternativi a combustione interna	19
Teleriscaldamento urbano (Impianto di Brescia).....	22
Normativa tecnica italiana	23
Bibliografia	30
Indice	30