

CAPITOLO 7

COGENERAZIONE

COGENERAZIONE

PRODUZIONE CONTEMPORANEA DI ENERGIA ELETTRICA E CALORE

UNA CENTRALE TERMoeLETTRICA CHE PRODUCE CONTEMPORANEAMENTE ENERGIA ELETTRICA E CALORE VIENE DEFINITA "CENTRALE DI COGENERAZIONE" O "COGENERATIVA"

LA COGENERAZIONE E' POSSIBILE CON CENTRALI TERMoeLETTRICHE BASATE SUI SEGUENTI MOTORI PRIMI:

- TURBINA A VAPORE
- TURBINA A GAS
- MOTORI ALTERNATIVI A COMBUSTIONE INTERNA
- CICLI COMBINATI TURBINA A GAS + TURBINA A VAPORE

SCOPO DELLA COGENERAZIONE E' OTTENERE RENDIMENTI COMPLESSIVI DI UTILIZZAZIONE DEL COMBUSTIBILE PIU' ELEVATI DI QUANTO NON SIA CONSENTITO CON LA GENERAZIONE ELETTRICA PURA

POTENZA IMMESSA COL COMBUSTIBILE

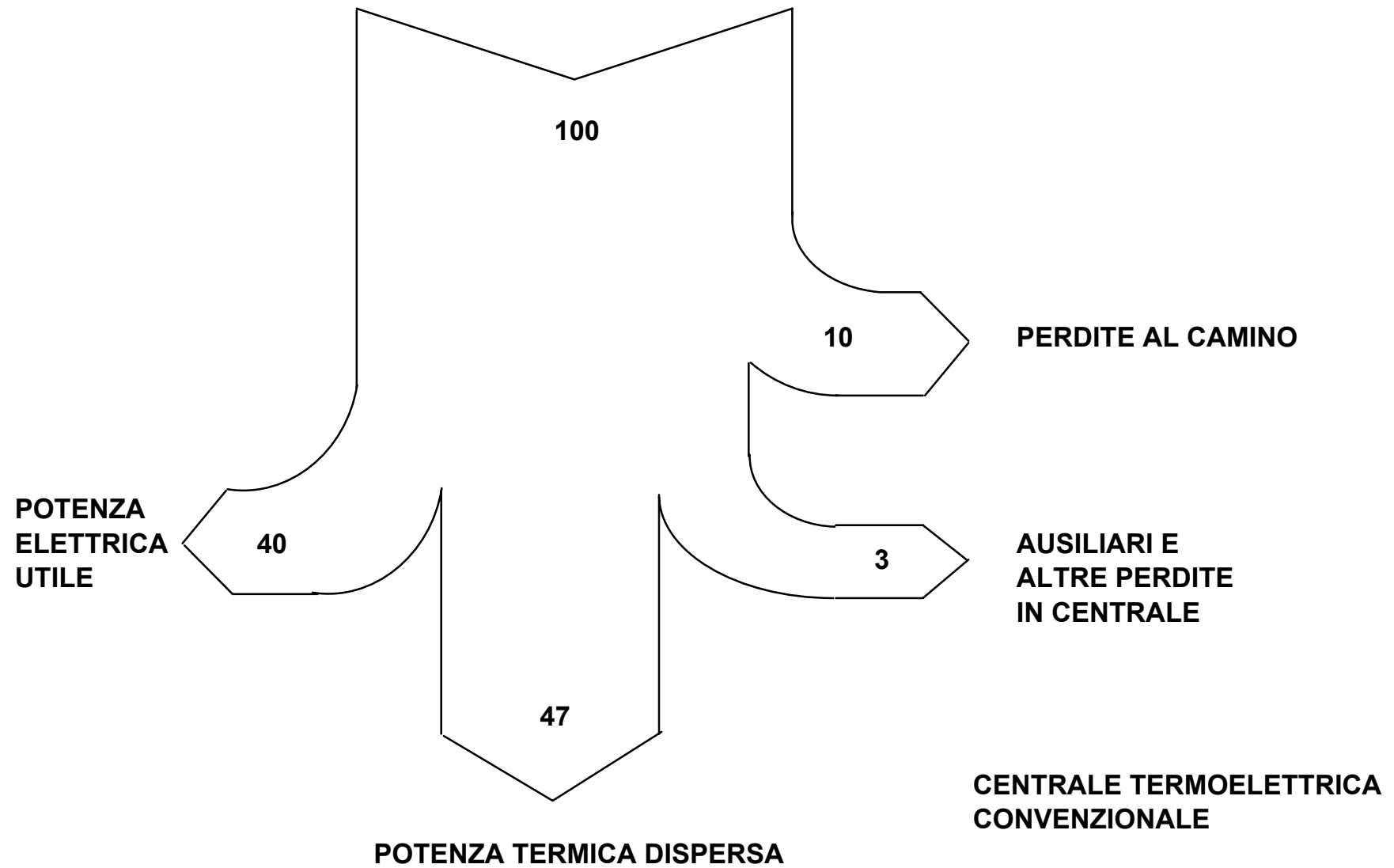


FIGURA 7.1

POTENZA IMMESSA COL COMBUSTIBILE

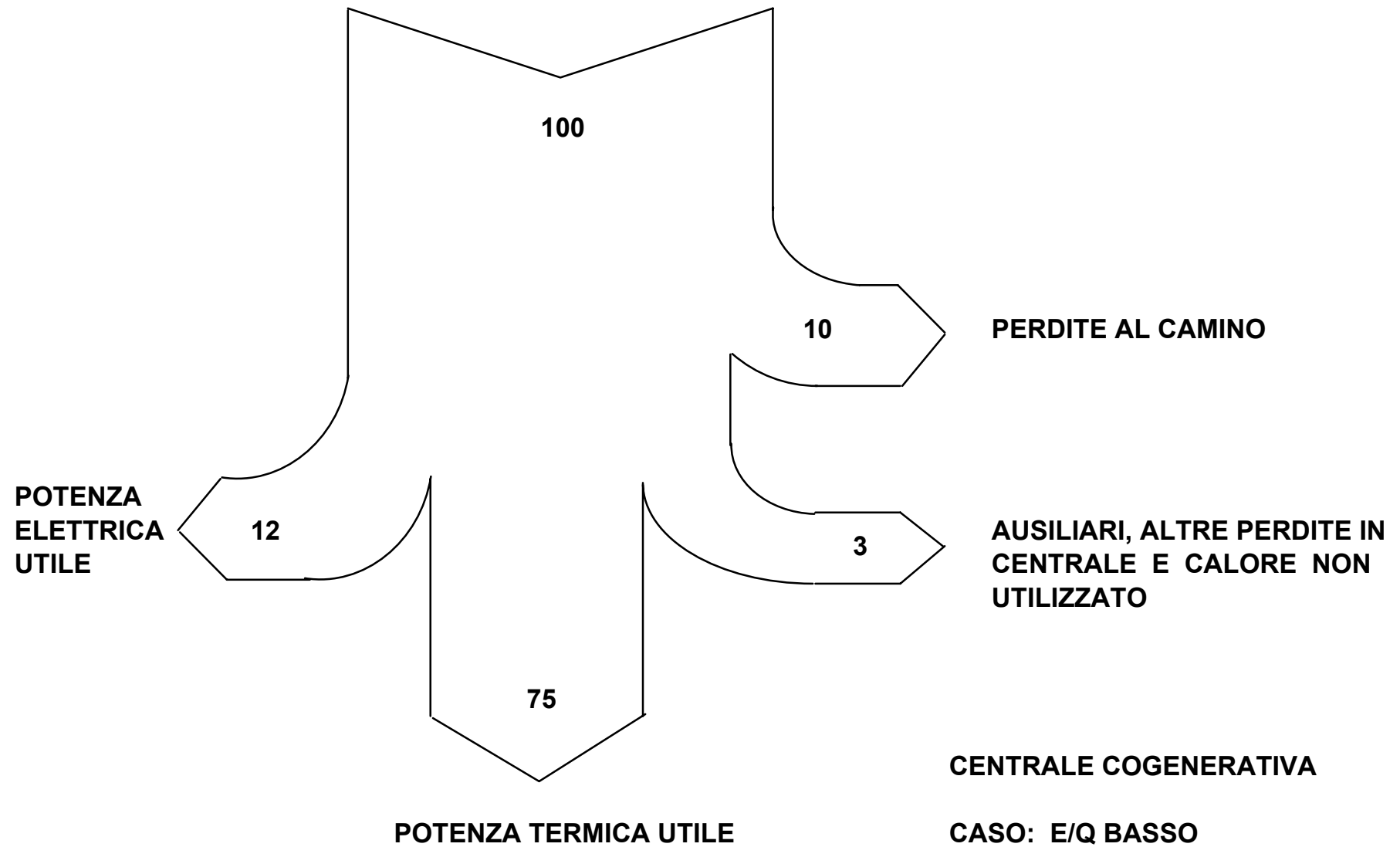


FIGURA 7.2

POTENZA IMMESSA COL COMBUSTIBILE

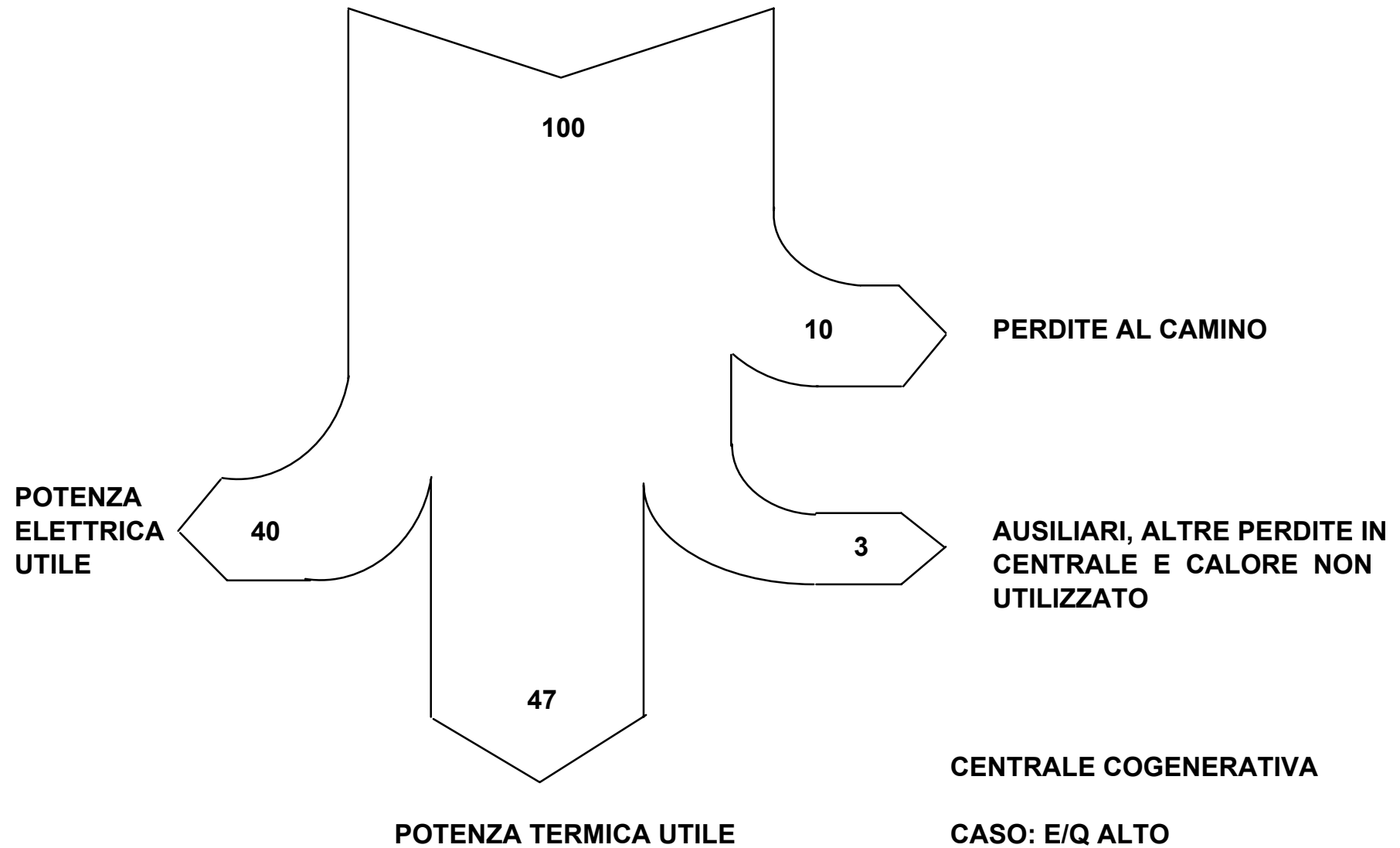


FIGURA 7.3

SCELTA DELL'IMPIANTO DI COGENERAZIONE IN BASE ALLE CARATTERISTICHE DELL'UTENZA

OGNI IMPIANTO DI COGENERAZIONE, IN FUNZIONE DEL TIPO DI MOTORE PRIMO E DELLE SOLUZIONI IMPIANTISTICHE ADOTTATE, E' CARATTERIZZATO DA UN BEN DETERMINATO RAPPORTO E/Q

E = ENERGIA ELETTRICA PRODUCIBILE

Q = CALORE RECUPERABILE

ANCHE L'UTENZA DELL'IMPIANTO E' CARATTERIZZATA DA UN PROPRIO VALORE DEL RAPPORTO E/Q

E = ENERGIA ELETTRICA ASSORBITA

Q = CALORE CONSUMATO

L'IMPIANTO DI COGENERAZIONE DEVE ESSERE PROGETTATO IN MODO CHE IL SUO E/Q SI AVVICINI IL PIU' POSSIBILE AL RAPPORTO E/Q DELL'UTENZA A REGIME E, COMUNQUE, E/Q DELL'IMPIANTO DEVE SEMPRE ESSERE MAGGIORE DI QUELLO DELL'UTENZA

SCHEMA DI PRINCIPIO DI UN IMPIANTO DI COGENERAZIONE

IL SISTEMA ELETTRICO CONNESSO ALL'IMPIANTO DI COGENERAZIONE E' COLLEGATO IN PARALLELO CON LA RETE PUBBLICA (ENEL, AZIENDE MUNICIPALIZZATE) E L'ENERGIA ELETTRICA PRODOTTA PUO' ESSERE SCAMBIATA NEI DUE SENSI CON QUEST'ULTIMA, SVINCOLANDO L'ANDAMENTO DELLA PRODUZIONE ELETTRICA DELL'IMPIANTO DALL'ANDAMENTO DEI FABBISOGNI DELL'UTENZA

IL SISTEMA TERMICO DELL'IMPIANTO DI COGENERAZIONE E' SEMPRE COMPLETATO DA UNA PIU' CALDAIE DI TIPO CONVENZIONALE, CHE SVOLGONO FUNZIONE DI INTEGRAZIONE (QUANDO L'ASSORBIMENTO DELL'UTENZA SUPERA LA POTENZA TERMICA PRODUCIBILE IN COGENERAZIONE) O RISERVA RISPETTO AL SISTEMA COGENERATIVO

SCHEMA DI PRINCIPIO DI UN IMPIANTO DI COGENERAZIONE

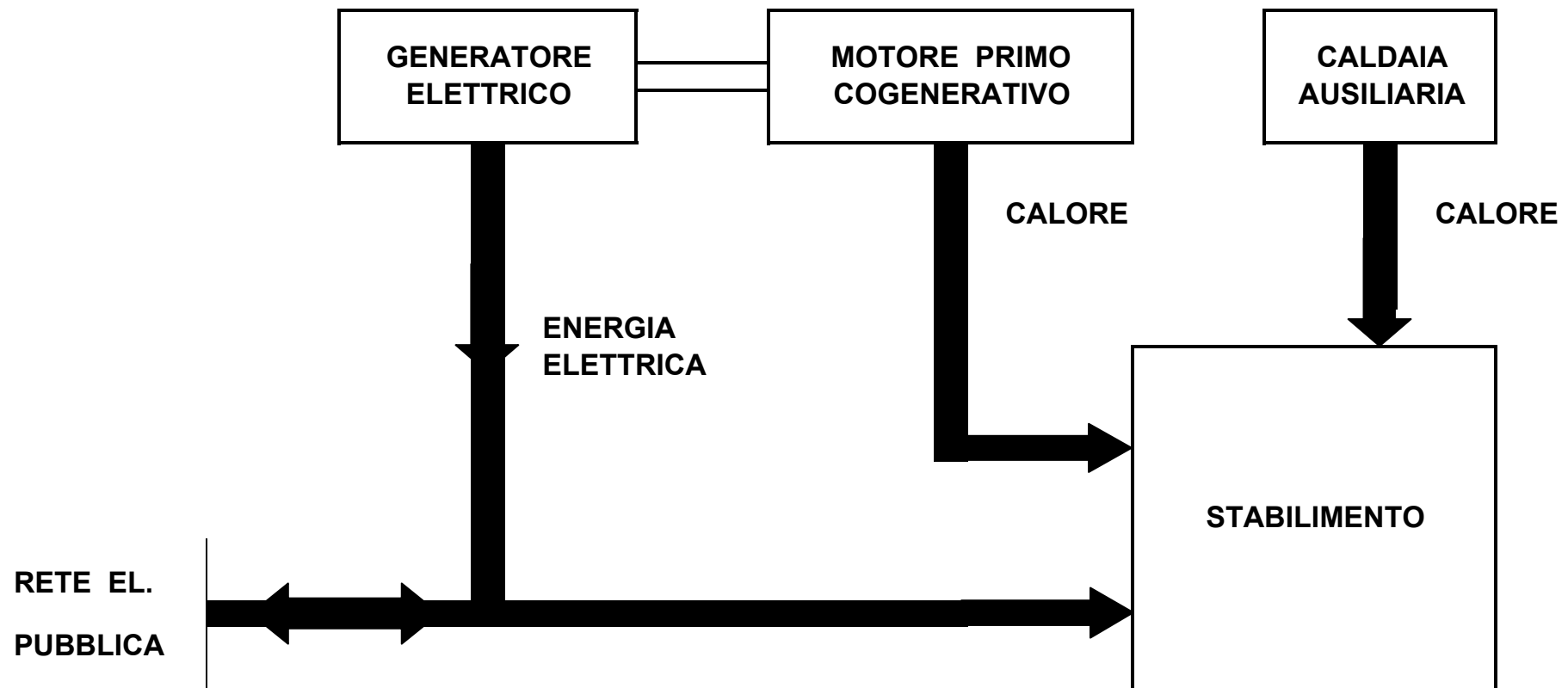


FIGURA 7.4

SCELTA DELL'IMPIANTO DI COGENERAZIONE IN BASE ALLE CARATTERISTICHE DELL'UTENZA

NELL'INDUSTRIA, L'ENERGIA ELETTRICA E' NORMALMENTE VALORIZZATA A PREZZI PIU' ALTI RISPETTO AL CALORE

SI CERCA DI OTTIMIZZARE IL DIMENSIONAMENTO DELL'IMPIANTO IN FUNZIONE DEGLI ASSORBIMENTI ELETTRICI DELL'UTENZA, E SOLO SECONDARIAMENTE IN BASE AI FABBISOGNI TERMICI DELL'UTENZA

L'ENERGIA ELETTRICA VIENE GENERALMENTE AUTOPRODOTTA PER AUTOCONSUMO, SUL LUOGO STESSO DI PRODUZIONE O IN LUOGHI REMOTI (VETTORIAMENTO)
PIU' RARO, PERCHE' MENO REMUNERATIVO, E' IL CASO DI CESSIONE ALLA RETE PUBBLICA

NEL CASO DI AUTOCONSUMO, LA POSSIBILITA' DI SCAMBIARE ENERGIA ELETTRICA CON LA RETE NEI DUE VERSI CONSENTE, ENTRO CERTI LIMITI, DI SVINCOLARE L'ANDAMENTO TEMPORALE DELLA PRODUZIONE DI ENERGIA DA QUELLO DEL CONSUMO

GESTIONE DELL'IMPIANTO DI COGENERAZIONE IN BASE ALLE CURVE DI CARICO DELL'UTENZA

L'UTENZA POTRA' AVERE VARIAZIONI ANCHE SIGNIFICATIVE DEL PROPRIO RAPPORTO E/Q IN FUNZIONE DI MOLTI FATTORI (ORA DEL GIORNO, GIORNO DELLA SETTIMANA, STAGIONE DELL'ANNO, SVILUPPO DELLA PRODUZIONE, ECC.)

VANNO PREVISTE E GESTITE LE SEGUENTI CONDIZIONI OPERATIVE PER LA CENTRALE DI PRODUZIONE:

- ESUBERO DI PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA
- DEFICIT DI PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA
- ESUBERO DI PRODUZIONE DI CALORE
- DEFICIT DI PRODUZIONE DI CALORE.

GESTIONE OPERATIVA DI UN IMPIANTO DI COGENERAZIONE ENERGIA ELETTRICA

ESUBERO DI PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA

L'ESUBERO VIENE RIVERSATO SULLA RETE ELETTRICA PUBBLICA – ALLO STATO ATTUALE, PUO' AVERE DUE UTILIZZI:

- VETTORIAMENTO VERSO UN'ALTRA UTENZA CHE APPARTIENE AL PROPRIETARIO DELL'IMPIANTO
- VENDITA AD UN ALTRO SOGGETTO (TRAMITE APPOSITO CONTRATTO)

DEFICIT DI PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA

L'ENERGIA ELETTRICA MANCANTE PER L'UTENZA VIENE APPROVVIGIONATA DALLA RETE, MEDIANTE APPOSITO CONTRATTO DA STIPULARE CON UN PRODUTTORE / DISTRIBUTORE

GESTIONE OPERATIVA DI UN IMPIANTO DI COGENERAZIONE CALORE

ESUBERO DI PRODUZIONE DI CALORE

NORMALMENTE, IL CALORE IN ESUBERO PRODOTTO DALL'IMPIANTO DI COGENERAZIONE VIENE EVACUATO ALL'AMBIENTE ESTERNO SE E' DISPONIBILE UN SISTEMA DI ACCUMULO DI CALORE (CASO MOLTO RARO) E NEI LIMITI DELLA CAPACITA' DI QUESTO, L'ESUBERO DI CALORE PUO' ESSERE STOCCATO PER UN SUCCESSIVO UTILIZZO NEI MOMENTI DI PUNTA DEL CARICO TERMICO

DEFICIT DI PRODUZIONE DI CALORE

IL DEFICIT DI ENERGIA TERMICA VIENE SODDISFATTO MEDIANTE L'IMPIEGO DI CALDAIE SEMPLICI DI INTEGRAZIONE INSTALLATE PRESSO L'UTENZA

GESTIONE OPERATIVA DI UN IMPIANTO DI COGENERAZIONE

QUANTO DESCRITTO MOSTRA CHE L'ENERGIA ELETTRICA PRODOTTA TROVA SEMPRE COMPLETO UTILIZZO E, QUINDI, LE SITUAZIONI IN CUI E/Q DELL'IMPIANTO SUPERA QUELLO DELL'UTENZA NON COMPORTANO SPRECHI ENERGETICI

SE INVECE E/Q DELL'IMPIANTO E' INFERIORE A QUELLO DELL'UTENZA, SI PUO' AVERE ESUBERO DI CALORE, CHE NORMALMENTE VIENE EVACUATO, CON SPRECO ENERGETICO

PER QUESTO, NELLA SCELTA DEL TIPO DI IMPIANTO SI CERCA DI EVITARE QUESTO SECONDO CASO

MODALITA' DI GESTIONE DI UN IMPIANTO DI COGENERAZIONE

CARICO ELETTRICO COMANDA

VIENE PREFISSATA LA POTENZA ELETTRICA CHE DEVE ESSERE PRODOTTA DALL'IMPIANTO LA PRODUZIONE DI ENERGIA TERMICA DA PARTE DELL'IMPIANTO DI COGENERAZIONE E' UNA CONSEGUENZA E RISULTA CONDIZIONATA DAL CARICO ELETTRICO, IN FUNZIONE DEL RAPPORTO E/Q PROPRIO DELL'IMPIANTO POTREBBEROI VERIFICARSI CASI DI ESUBERO DI CALORE E SUA EVACUAZIONE

CARICO TERMICO COMANDA

VIENE PREFISSATA LA POTENZA TERMICA (GENERALMENTE SULLA BASE DELLE ESIGENZE ISTANTANEE DELL'UTENZA) PER L'IMPIANTO DI COGENERAZIONE

LA POTENZA ELETTRICA SEGUE E RISULTA CONDIZIONATA SEMPRE IN BASE AL RAPPORTO E/Q DELL'IMPIANTO – GLI SBILANCIAMENTI RISPETTO AI FABBISOGNI DELL'UTENZA VENGONO COMPENSATI DALLA RETE

VALUTAZIONE DELLA CONVENIENZA AD INSTALLARE UN'IMPIANTO DI COGENERAZIONE

SI DEVONO ESEGUIRE I SEGUENTI PASSI:

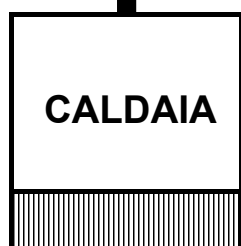
- SCELTA DEL TIPO DI MOTORE PRIMO PIU' IDONEO
- DIMENSIONAMENTO DELL'IMPIANTO E VALUTAZIONE DEL COSTO D'INVESTIMENTO
- SIMULAZIONE DEL COMPORTAMENTO DEL SISTEMA SULLA BASE DELLE CURVE DI DURATA DEI CARICHI ELETTRICI E TERMICI E DETERMINAZIONE DELLE ENERGIE ANNUE PRODUCIBILI E CONSUMATE DALL'IMPIANTO
- DETERMINAZIONE DEI FLUSSI DI CASSA ANNUI, IN BASE ALLE ENERGIE IN GIOCO ED AI RISPETTIVI PREZZI DI VALORIZZAZIONE
- VALUTAZIONE DI CONVENIENZA, MEDIANTE CONFRONTO FRA IL COSTO D'INVESTIMENTO ED IL MARGINE OPERATIVO LORDO

BILANCIO ECONOMICO DEL FUNZIONAMENTO DELLE CALDAIE

TARIFFE DEL GAS ALTE

ENERGIA TERMICA

1 kWh = 0,055 Euro



GAS

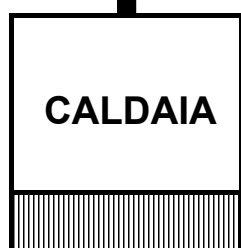
$1 / 85\% = 1,176 \text{ kWh}$

$1,176 \text{ kWh} \times 0,45 \text{ Euro/Smc} / 9,6 \text{ kWh/Smc} = 0,055 \text{ Euro}$

TARIFFE DEL GAS BASSE

ENERGIA TERMICA

1 kWh = 0,044 Euro



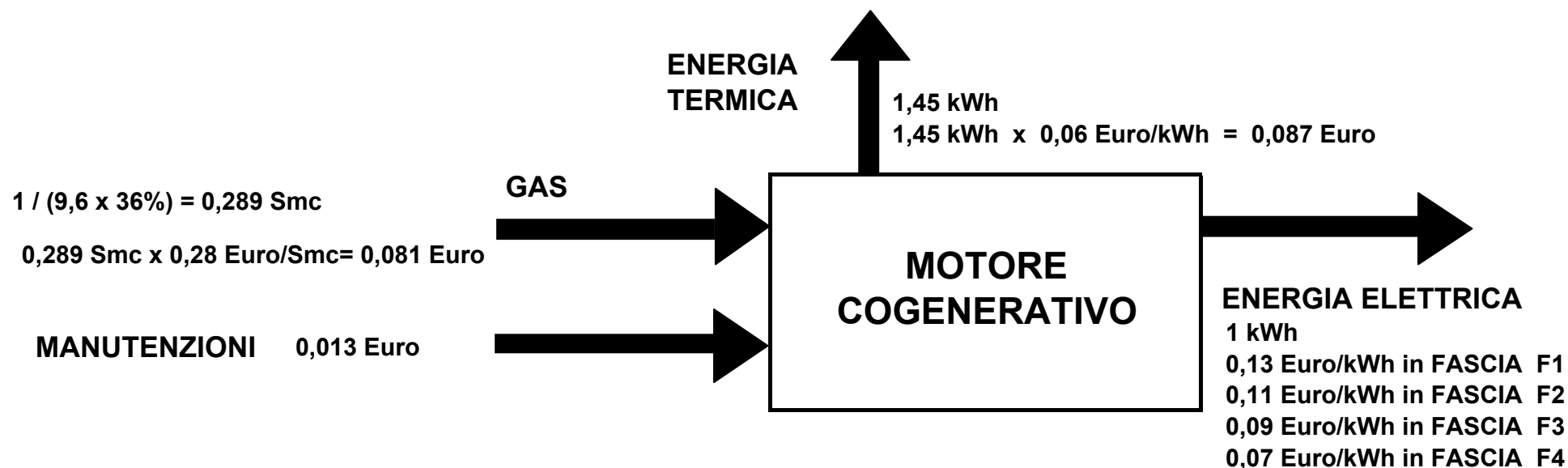
GAS

$1 / 85\% = 1,176 \text{ kWh}$

$1,176 \text{ kWh} \times 0,36 \text{ Euro/Smc} / 9,6 \text{ kWh/Smc} = 0,044 \text{ Euro}$

FIGURA 7.5

ESEMPIO DI BILANCIO ECONOMICO DEL FUNZIONAMENTO DI GRUPPI DI COGENERAZIONE TARIFFE DEL GAS ALTE

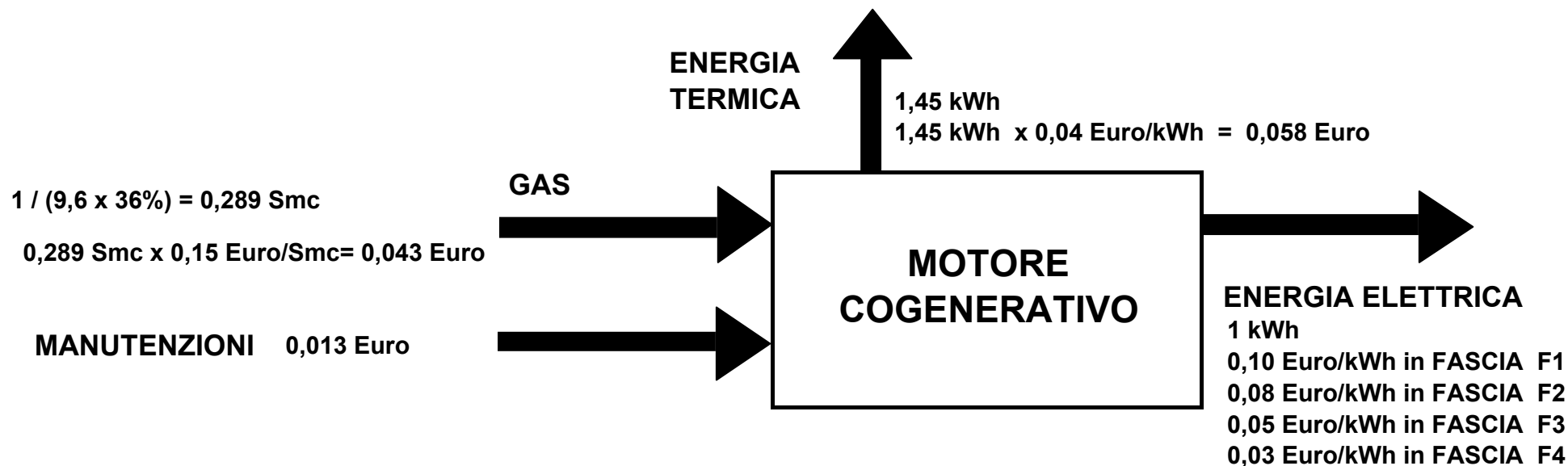


Il funzionamento del motore cogenerativo risulta conveniente nelle seguenti condizioni:

- FASCIA F1: sempre, essendo il valore al kWh dell'energia elettrica superiore al costo del gas+manutenzioni
- FASCIA F2: sempre, essendo il valore al kWh dell'energia elettrica superiore al costo del gas+manutenzioni
- FASCIA F3: se l'energia termica utilizzabile è almeno pari a 0,13 kWh per ogni kWh elettrico, corrispondente al recupero di 131 kW termici per ciascun motore
- FASCIA F4: se l'energia termica utilizzabile è almeno pari a 0,43 kWh per ogni kWh elettrico, corrispondente al recupero di 439 kW termici per ciascun motore

FIGURA 7.6

ESEMPIO DI BILANCIO ECONOMICO DEL FUNZIONAMENTO DI GRUPPI DI COGENERAZIONE TARIFFE DEL GAS BASSE



Il funzionamento del motore cogenerativo risulta conveniente nelle seguenti condizioni:

- FASCIA F1: sempre, essendo il valore al kWh dell'energia elettrica superiore al costo del gas+manutenzioni
- FASCIA F2: sempre, essendo il valore al kWh dell'energia elettrica superiore al costo del gas+manutenzioni
- FASCIA F3: se l'energia termica utilizzabile è almeno pari a 0,09 kWh per ogni kWh elettrico, corrispondente al recupero di 90 kW termici per ciascun motore
- FASCIA F4: se l'energia termica utilizzabile è almeno pari a 0,51 kWh per ogni kWh elettrico, corrispondente al recupero di 527 kW termici per ciascun motore

FIGURA 7.7

COGENERAZIONE CON TURBINE A VAPORE

POSSONO ESSERE UTILIZZATE PER IMPIANTI DI COGENERAZIONE SIA PER USO INDUSTRIALE CHE PER TELERISCALDAMENTO. SONO POSSIBILI:

- IMPIANTI A CONTROPRESSIONE: UTILIZZANO DIRETTAMENTE IL VAPORE PRELEVATO ALL'USCITA DELLA TURBINA (AD UNA PRESSIONE DELL'ORDINE DI QUALCHE BAR) PER COPRIRE I FABBISOGNI DI UTENZE INDUSTRIALI
- IMPIANTI A CONDENSATORE CALDO: UTILIZZANO IL VAPORE (PRELEVATO DALLA TURBINA AD UNA PRESSIONE DELL'ORDINE DI 1 BAR ASS. O POCO PIÙ) PER LA PRODUZIONE DI ACQUA CALDA O SURRISCALDATA DESTINATA A PARTICOLARI UTENZE (PER ESEMPIO, RETI DI TELERISCALDAMENTO)
- IMPIANTI MISTI: UNO DEI DUE SISTEMI SUDDETTI E' COMBINATO CON UN CONDENSATORE FREDDO. CIO' CONSENTE DI VARIARE IL RAPPORTO E/Q DELL'IMPIANTO, ADATTANDOLO ALLE ESIGENZE ISTANTANEE DELL'UTENZA

COGENERAZIONE CON TURBINE A GAS

SI EFFETTUA RECUPERANDO IL CALORE CHE I GAS DI SCARICO DALLA TURBINA POSSEGGONO PER EFFETTO DELLA LORO TEMPERATURA MOLTO ELEVATA, PER RISCALDARE DEI FLUIDI DA IMPIEGARE IN ALTRI IMPIANTI

LA TEMPERATURA MOLTO ELEVATA DEI GAS DI SCARICO CONSENTE IL LORO IMPIEGO IN COGENERAZIONE ANCHE IN CASI IN CUI SONO RICHIESTI FLUIDI A TEMPERATURA MOLTO ELEVATA

SE I GAS SONO UTILIZZATI PER PRODURRE ACQUA CALDA, PER PICCOLE POTENZIALITA' PUO' ESSERE SUFFICIENTE L'IMPIEGO DI UNO SCAMBIATORE DI CALORE (GENERALMENTE DI TIPO SHELL AND TUBE)

PER PRODURRE VAPORE, E' NECESSARIO UN COMPONENTE PIU' COMPLESSO, DENOMINATO CALDAIA A RECUPERO

COGENERAZIONE CON MOTORI A COMBUSTIONE INTERNA

POSSONO ESSERE UTILIZZATI:

- MOTORI A CICLO OTTO (ALIMENTATI A GAS NATURALE)
- MOTORI A CICLO DIESEL (ALIMENTATI A GASOLIO OD OLIO COMBUSTIBILE).

I MOTORI A CICLO OTTO SONO SPESSO PREFERITI A MOTIVO DEL MINOR COSTO SPECIFICO DEL GAS NATURALE IN CONFRONTO AI COMBUSTIBILI LIQUIDI

I MOTORI A CICLO OTTO SONO DISPONIBILI PER TAGLIE DI IMPIANTO SOLO MEDIO-PICCOLE (POTENZA ELETTRICA DI POCHI MW)

PER TAGLIE SUPERIORI SI UTILIZZANO MOTORI A CICLO DIESEL

COGENERAZIONE CON MOTORI A COMBUSTIONE INTERNA

IL CALORE PUÒ ESSERE RECUPERATO IN DUE MODI:

- DALL'ACQUA DEL SISTEMA DI RAFFREDDAMENTO, PER PRODURRE ACQUA CALDA, AD UNA TEMPERATURA MASSIMA DI CIRCA 85°C
- DAI GAS DI SCARICO, CHE HANNO UNA TEMPERATURA MOLTO ELEVATA, PER CUI È POSSIBILE PRODURRE FLUIDI AD ELEVATO LIVELLO TERMICO (IN GENERE, VAPORE). SE L'UNICO FLUIDO RICHIESTO È ACQUA CALDA, CON UN UNICO CIRCUITO SI RECUPERA IL CALORE, IN SERIE, PRIMA DAL SISTEMA DI RAFFREDDAMENTO E POI DAI GAS DI SCARICO

COGENERAZIONE IMPLICAZIONI SULLA PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA

NEL CASO DI IMPIANTI CON TURBINA A GAS E CON MOTORI ALTERNATIVI A COMBUSTIONE INTERNA, IL RECUPERO E L'UTILIZZO DEL CALORE DI SCARICO NON INCIDE ASSOLUTAMENTE SULLA PRODUZIONE ELETTRICA, PERCHE' AVVIENE AL DI FUORI DEL CICLO TERMODINAMICO, SENZA ALTERARLO IN NESSUNA PARTE

NEL CASO DI TURBINA A VAPORE IL RECUPERO DI CALORE COMPORTA UNA RIDUZIONE DELLA PRODUZIONE ELETTRICA A PARITA' DI ENERGIA TERMICA ENTRANTE NEL CICLO (RIDUZIONE DEL RENDIMENTO ELETTRICO), PERCHE' IL VAPORE VIENE ESTRATTO DALLA TURBINA A PRESSIONE PIU' ELEVATA RISPETTO AD UN CICLO NON COGENERATIVO

TALE RIDUZIONE E' TANTO MAGGIORE, QUANTO MAGGIORE E' LA TEMPERATURA A CUI E' RICHIESTO IL CALORE DA PARTE DELL'UTENZA

COGENERAZIONE

CONFRONTO DI PRESTAZIONI FRA VARI MOTORI PRIMI

SIMBOLOGIA

E = ENERGIA ELETTRICA PRODOTTA

Q_r = CALORE RECUPERATO

Q_e = CALORE ENTRANTE NEL CICLO

η_{ee} = E/Q_e = RENDIMENTO DI PRODUZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA

η_{th} = Q_r/Q_e = RENDIMENTO DI PRODUZIONE DELL'ENERGIA TERMICA

$$\eta = \eta_{ee} + \eta_{th} = \frac{E + Q_r}{Q_e}$$

COGENERAZIONE

CONFRONTO DI PRESTAZIONI FRA VARI MOTORI PRIMI

MOTORE PRIMO	CICLO SEMPLICE NON COGENER. $\eta_{ee} = \eta$	CICLO COGENERATIVO			
		η_{ee}	η_{th}	η	E/Q
TURBINA A VAPORE	0,30÷0,43	0,10÷ 0,30	0,40÷ 0,70	0,70÷ 0,90	0,15÷0,60
TURBINA A GAS	0,20÷0,42	0,20÷ 0,42	0,40÷ 0,60	0,70÷ 0,85	0,35÷1,00
MOTORI ALTERNATIVI	0,32÷0,42	0,32÷ 0,42	0,40÷ 0,50	0,75÷ 0,85	0,65÷1,00
TURBINA A GAS + TURBINA A VAPORE (CICLO COMBINATO)	0,43÷0,55	0,35÷ 0,50	0,20÷ 0,40	0,65÷ 0,85	0,80÷1,50

TAGLIE DEGLI IMPIANTI DI COGENERAZIONE

DIPENDONO ESSENZIALMENTE DALLE TAGLIE DEI MOTORI PRIMI COMMERCIALMENTE DISPONIBILI:

- TURBINA A VAPORE: $1 \div 600 \text{ MWe}$
- TURBINA A GAS: $0,5 \div 250 \text{ MWe}$
- MOTORE A GAS A CICLO OTTO: $0,015 \div 3 \text{ MWe}$
- MOTORE A CICLO DIESEL: $0,5 \div 50 \text{ MWe}$
- CICLO COMBINATO GAS-VAPORE: $10 \div 400 \text{ MWe}$

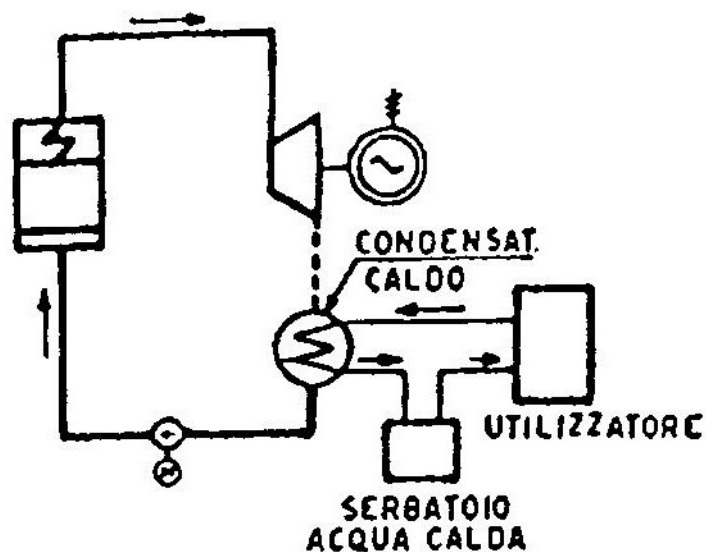
UTILIZZI TIPICI DI COGENERAZIONE

A) SISTEMI DI TELERISCALDAMENTO

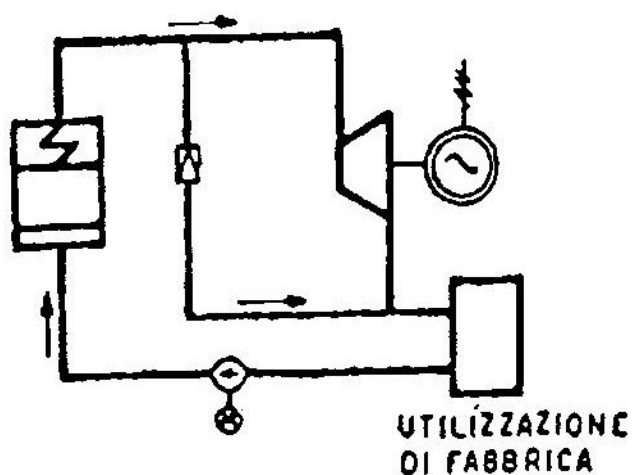
B) UTILIZZI INDUSTRIALI:

- INDUSTRIA CARTARIA;
- INDUSTRIA TESSILE;
- INDUSTRIA PETROLCHIMICA;
- INDUSTRIA ALIMENTARE;
- ALTRI SETTORI INDUSTRIALI CARATTERIZZATI DA RILEVANTI CONSUMI TERMICI DI PROCESSO (SPECIE SE A BASSA TEMPERATURA).

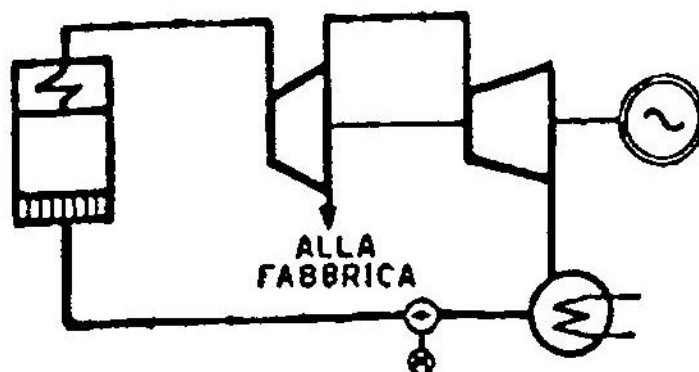
TURBINA A CONDENSATORE A CALDO



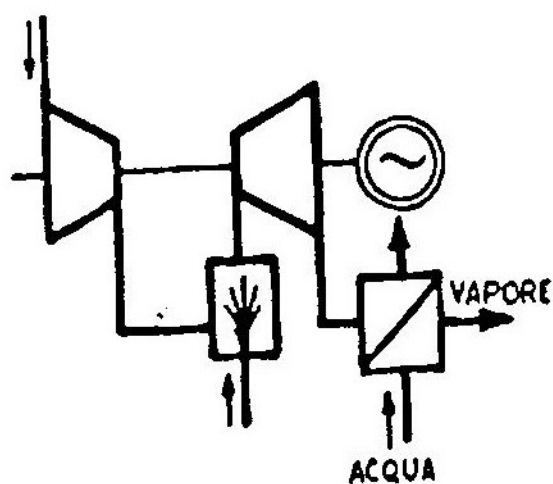
TURBINA A CONTROPRESSIONE PURA IN PARALLELO CON LA RETE ESTERNA



GRUPPO MISTO CON SPILLAMENTO E CONDENSAZIONE



GRUPPO TURBOGAS CON RECUPERO DEL CALORE DEI GAS DI SCARICO MEDIANTE UNA CALDAIA A RECUPERO CON PRODUZIONE DI VAPORE PER USO TECNOLOGICO



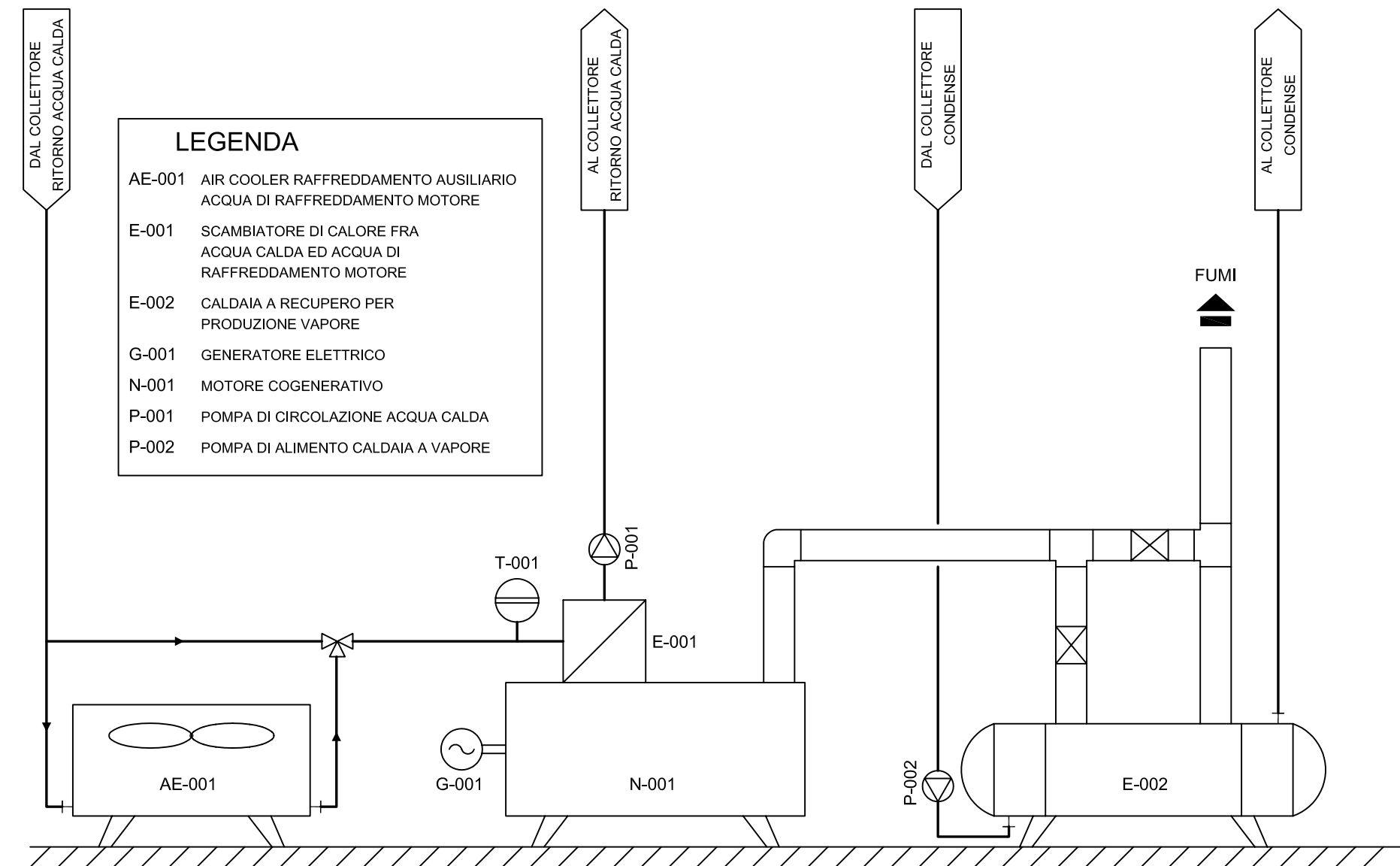


FIGURA 7.8
SCHEMA CONCETTUALE DI UN MOTORE ALTERNATIVO COGENERATIVO,
CON PRODUZIONE DI ACQUA CALDA E VAPORE

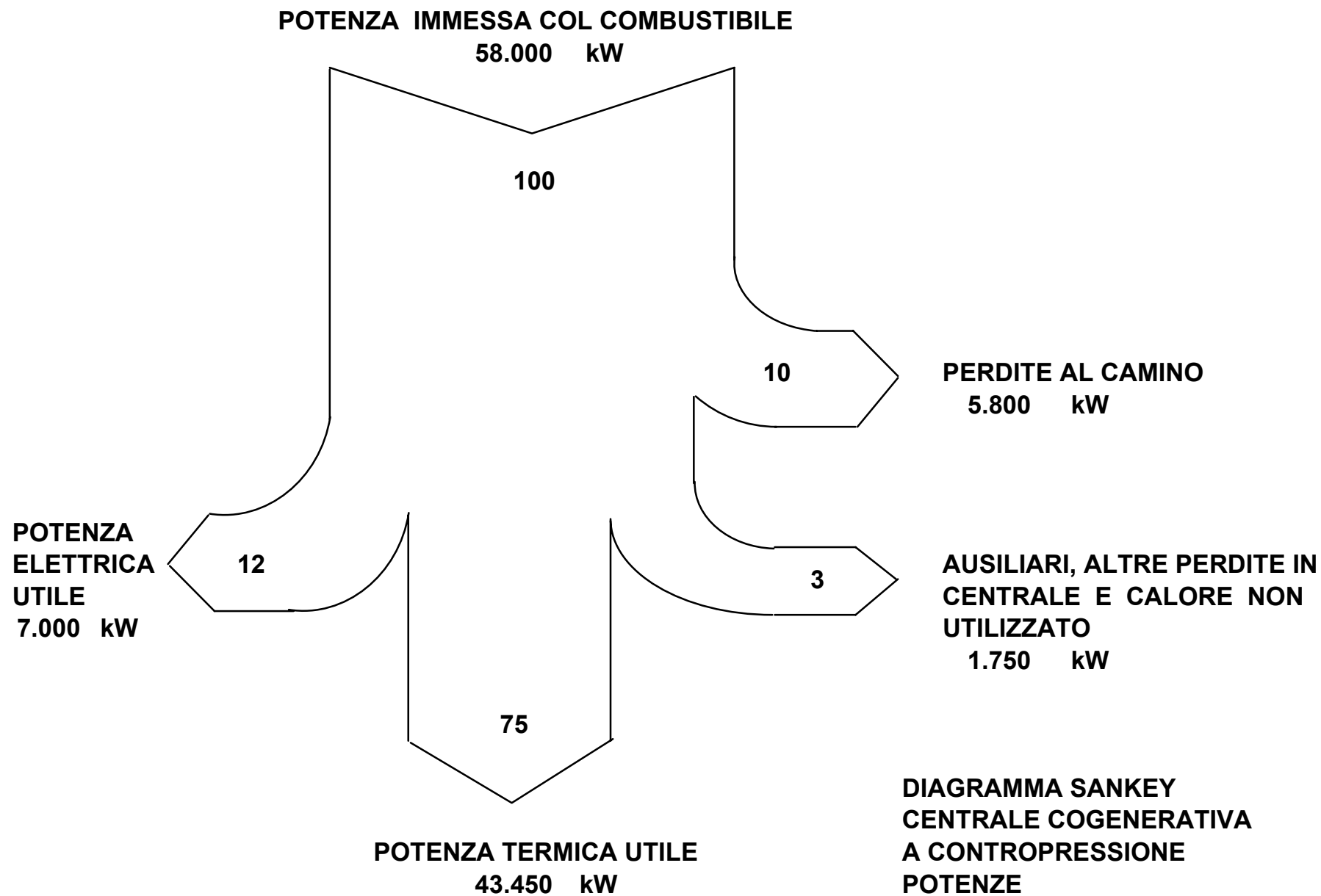


FIGURA 7.9

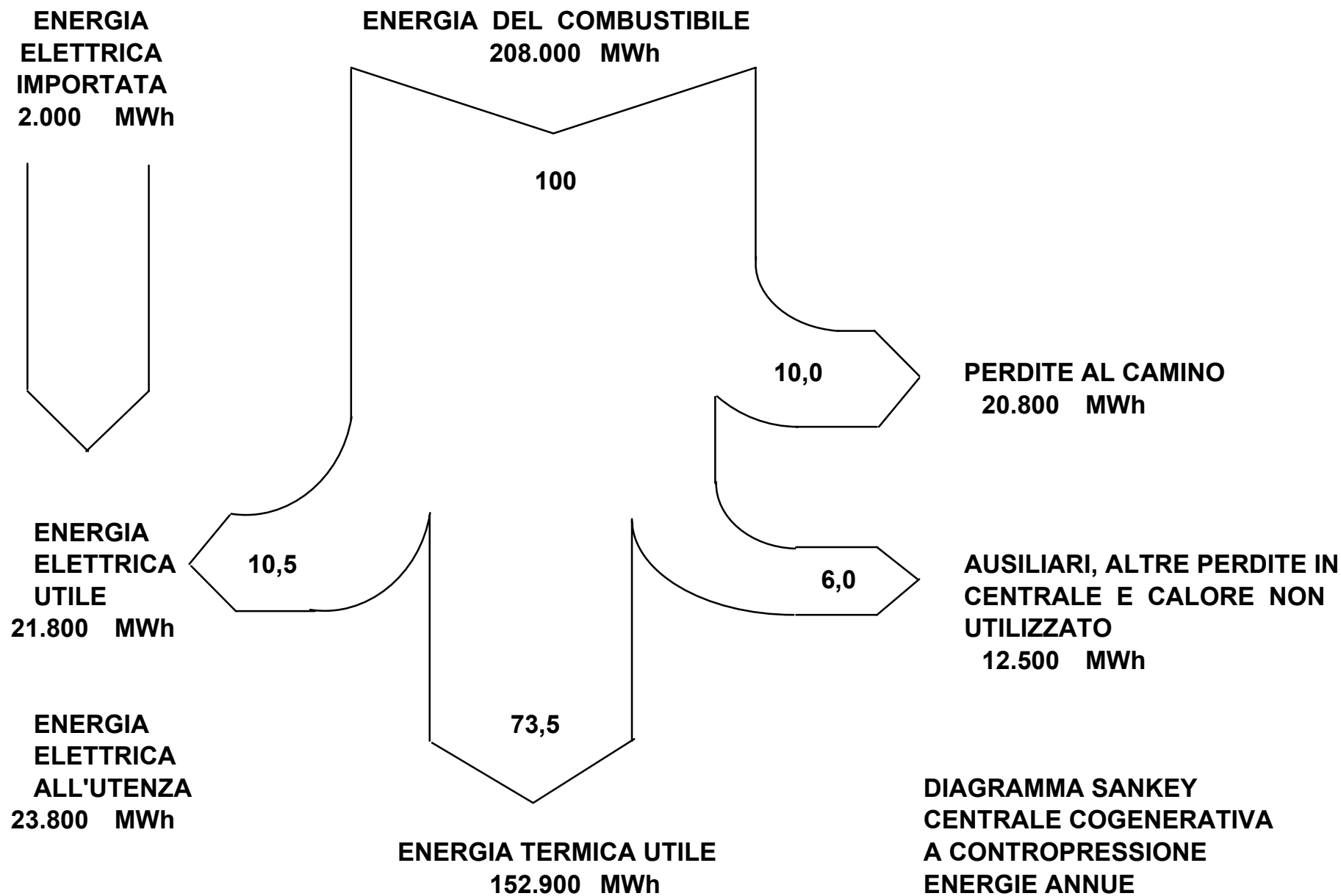


FIGURA 7.10

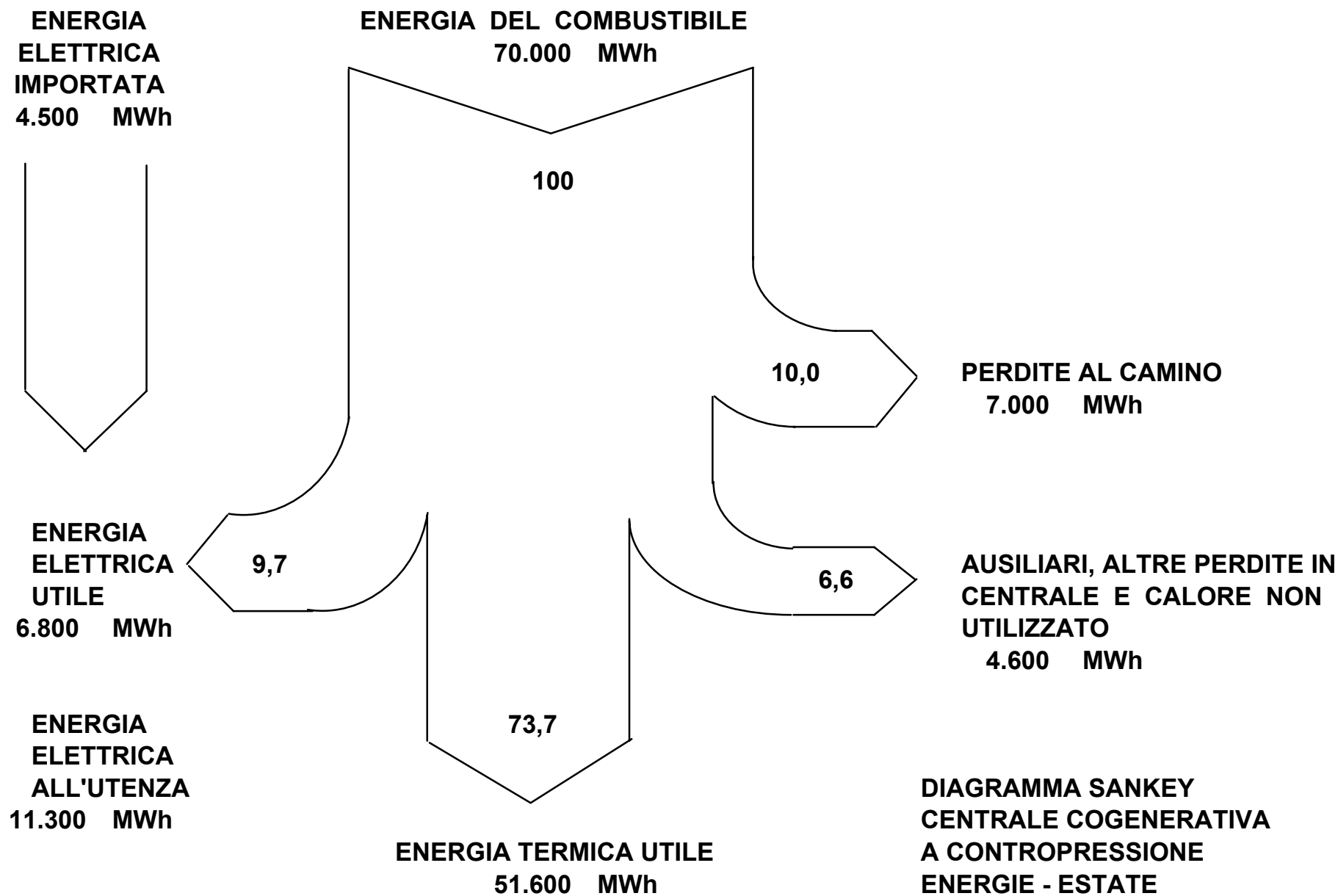


FIGURA 7.11

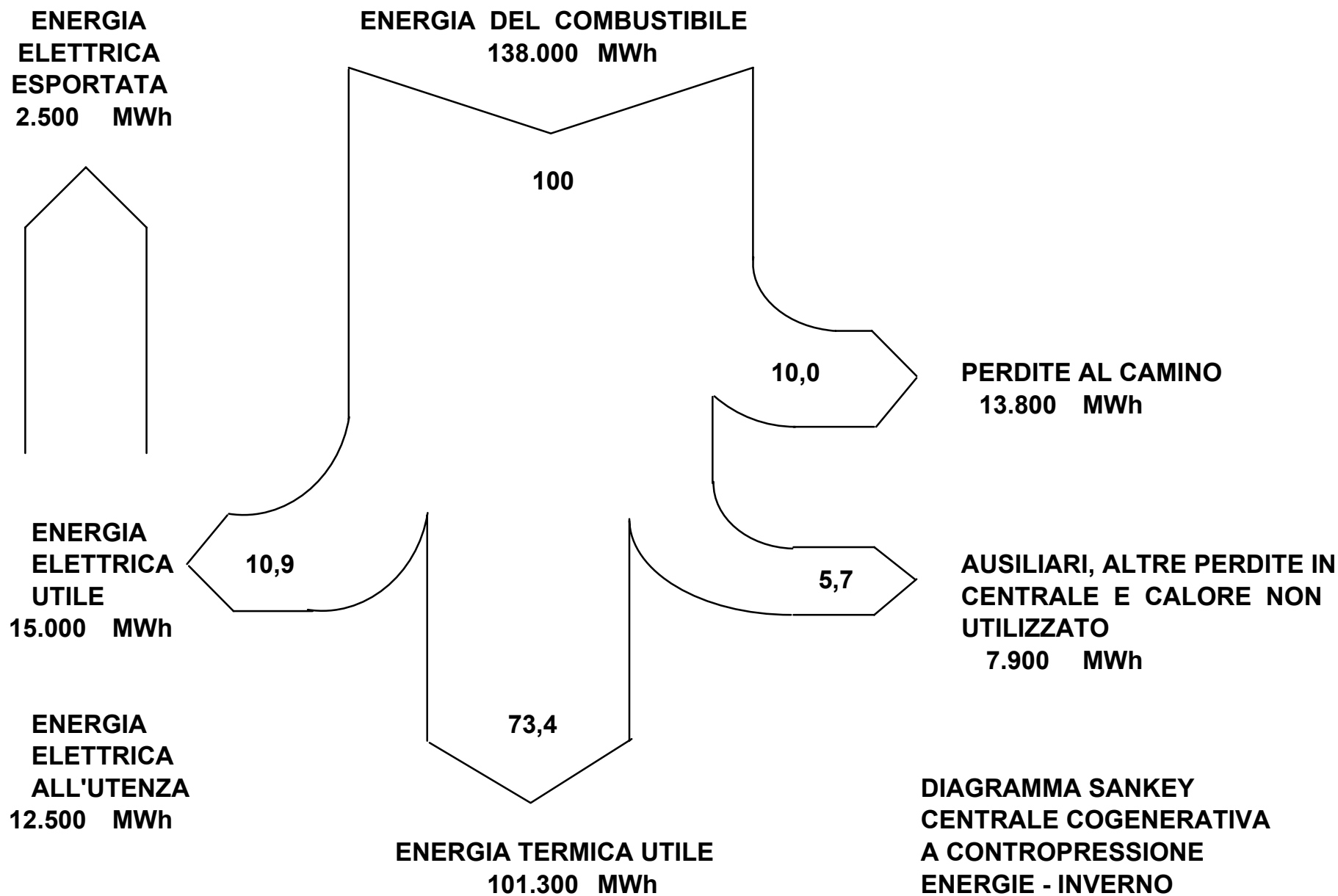


FIGURA 7.12

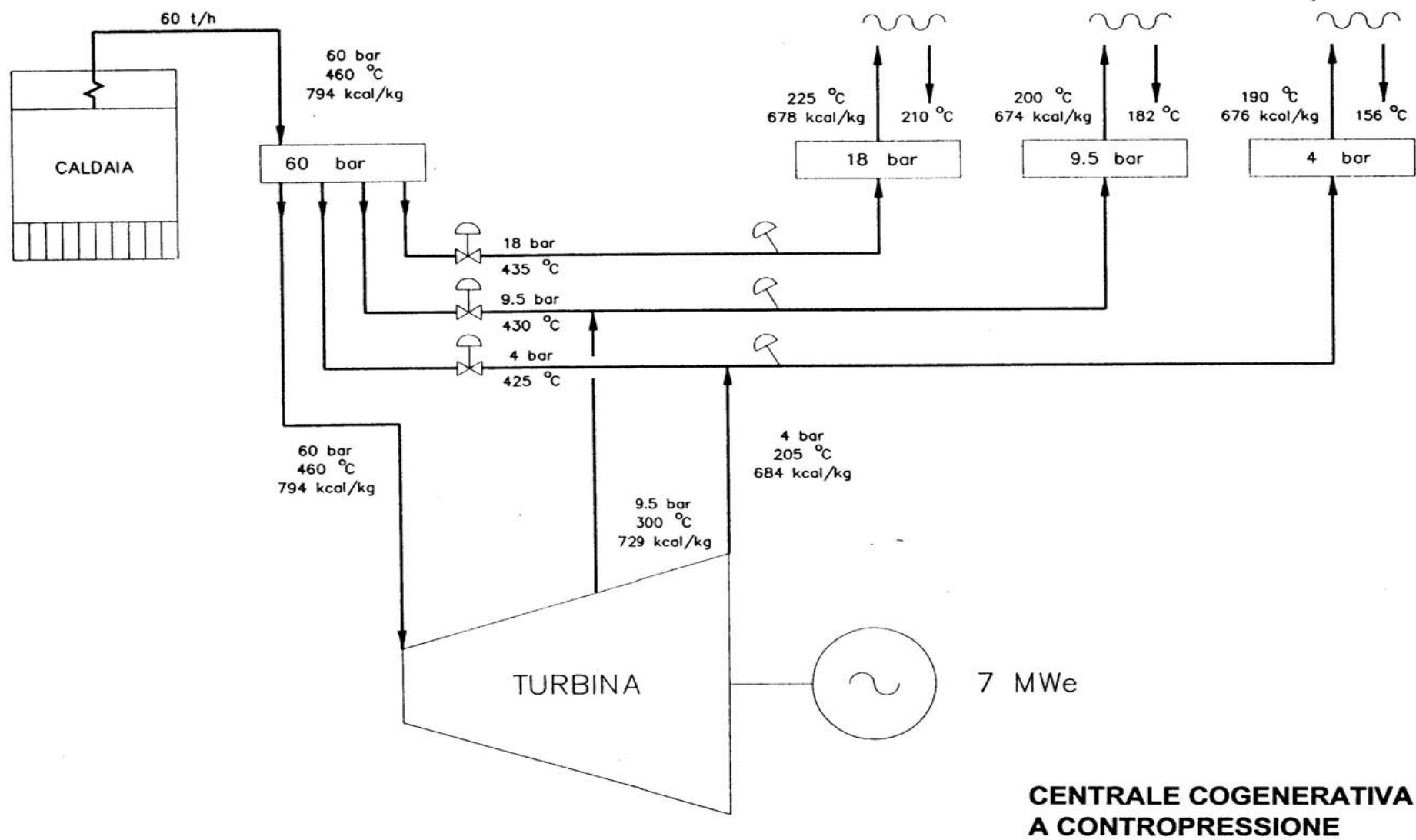


FIGURA 7.13