

Capitolo I

La cogenerazione

1.1 Introduzione

L'idea alla base della cogenerazione è nota: in ogni ciclo termodinamico che genera energia elettrica utilizzando come fonte energetica calore ad alta temperatura (come quello generato dalla combustione di un combustibile fossile), è necessario cedere calore a più bassa temperatura, (in genere all'ambiente). Il calore viene ceduto direttamente scaricando i prodotti di combustione e/o indirettamente con uno scambiatore di calore, e rappresenta una quota rilevante del calore immesso nel ciclo; tale calore è dunque una perdita che penalizza le prestazioni energetiche del ciclo termodinamico. Se questo calore, anche solo parzialmente,

viene recuperato perché esiste un utilizzatore di energia termica, si realizza un sistema di cogenerazione e si incrementa il rendimento del ciclo termodinamico.

La cogenerazione prevede dunque la produzione combinata di energia elettrica e di energia termica mediante il recupero in forma utile di parte del calore che nella produzione di sola energia elettrica viene ceduta all'ambiente.

Ciò determina un risparmio energetico (si risparmia il combustibile altrimenti necessario a soddisfare l'utilizzatore di energia termica) e di conseguenza un vantaggio ambientale rispetto alla produzione separata delle stesse quantità di energia elettrica e calore.

La cogenerazione è quindi una tecnologia che, unendo in un unico impianto la produzione di energia elettrica e la produzione di calore, sfrutta in modo ottimale l'energia primaria dei combustibili, consentendo pertanto di incrementare l'efficienza energetica complessiva di un sistema di conversione di energia.

Rispetto alla produzione separata delle stesse quantità di energia elettrica e calore, la produzione combinata comporta quindi:

- un risparmio economico conseguente al minor consumo di combustibile;
- una riduzione dell'impatto ambientale, conseguente sia alla riduzione delle emissioni che al minor rilascio di calore residuo nell'ambiente (minor inquinamento atmosferico e minor inquinamento termico);
- minori perdite di trasmissione e distribuzione per il sistema elettrico nazionale, conseguenti alla localizzazione degli impianti in prossimità dei bacini di utenza o all'autoconsumo dell'energia prodotta;

- la sostituzione di modalità di fornitura del calore più inquinanti (caldaie, sia per usi civili che industriali, caratterizzate da bassi livelli di efficienza, elevato impatto ambientale e scarsa flessibilità relativamente all'utilizzo di combustibili).

La produzione combinata di energia elettrica e calore trova applicazione sia in ambito industriale, soprattutto nell'autoproduzione, che in ambito civile.

Il calore che, per evitare costi e perdite eccessive, non può essere trasportato per lunghe distanze, viene utilizzato, nella forma di vapore o di acqua calda, per usi di processo industriali o civili (es. riscaldamento urbano tramite reti di teleriscaldamento, nonché il raffreddamento tramite sistemi ad assorbimento) o, nella forma di aria calda, per processi industriali di essiccamento, mentre l'energia elettrica, che può contare su un'estesa rete di distribuzione, viene autoconsumata oppure immessa in rete.

Le modalità di prelievo dell'energia elettrica e termica prodotte sono spesso caratterizzate da profili indipendenti e variabili nel tempo (processi continui, discontinui su base giornaliera e stagionale).

In alcuni settori industriali la produzione combinata di energia elettrica e calore costituisce un'opzione produttiva ampiamente consolidata che potrà assumere un peso ancor più rilevante, sia in termini di apporti alla domanda elettrica nazionale che di risparmio energetico, in virtù dell'innovazione tecnologica in atto nel segmento della generazione di energia elettrica.

1.2 Breve storia della cogenerazione

L'Italia, da sempre povera di risorse fossili, ha cominciato a privilegiare la produzione combinata di elettricità e calore a partire dal secondo dopoguerra. Il successo della cogenerazione ha subito da allora andamenti molto altalenanti a seconda dei prezzi dei combustibili fossili e dell'ambiente normativo nel quale operava. Negli anni '60 la nazionalizzazione del settore elettrico e la disponibilità di prodotti petroliferi a basso costo ha provocato un rallentamento della sua diffusione; la crisi petrolifera dei primi anni '70 ha invece riportato sulla cogenerazione un diffuso interesse, ostacolato però da una serie di provvedimenti normativi, tra cui l'introduzione del sovrapprezzo termico (1) e delle tariffe multiorarie (2).

Con la legge 29 maggio 1982, n. 308 ("Norme sul contenimento dei consumi energetici, lo sviluppo delle fonti rinnovabili di energia e l'esercizio di centrali elettriche alimentate con combustibili diversi dagli idrocarburi") vennero introdotti incentivi in conto capitale per il risparmio energetico e lo sviluppo delle fonti rinnovabili e un nuovo quadro giuridico per la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili e da cogenerazione.

La legge mostrò alcuni limiti nella fase attuativa, con forti ritardi nell'elaborazione delle graduatorie per l'assegnazione degli incentivi, e un limite di potenza assegnato agli impianti troppo basso per stimolare una reale ripresa del settore.

Fu solo con il Piano Energetico Nazionale (PEN) del 1988 e le successive leggi attuative 9 gennaio 1991, n. 9 e 10 e il Provvedimento CIP 6/92 che è stato possibile dare un nuovo impulso allo sfruttamento delle fonti di energia rinnovabile e alla cogenerazione.

1 Deciso con provvedimento CIP n. 34 del 1974, il meccanismo del sovrapprezzo termico serviva per riportare gli eventuali aumenti dei prezzi del combustibile sugli utenti finali, salvaguardando il conto economico delle imprese elettriche. Rimasto in vigore per circa 20 anni, questo sistema ha di fatto sfavorito la diversificazione delle fonti e l'uso razionale dell'energia.

2 Introdotte con provvedimento CIP n. 44 del 1980, avevano lo scopo di ridurre la domanda nelle ore di punta.

1.3 Principi energetici e definizioni della cogenerazione

La normativa tecnica italiana in tema di produzione combinata di energia elettrica e calore è elaborata dal Comitato termotecnico italiano energia ambiente (CTI), ente federato UNI, al quale è stata conferita la delega per la normazione del settore termotecnico ed energetico. Relativamente alla cogenerazione, che è allocata nel Sottocomitato 4 - turbomacchine e macchine volumetriche, risultano pubblicate le seguenti norme:

- UNI 8887-87 Sistemi per processi di cogenerazione – Definizione e classificazione;
- UNI 8888-88 Gruppi per la produzione combinata di energia elettrica e calore azionati da motori a combustione interna – Metodi di prova in laboratorio;
- UNI 9927-92 Gruppi per la produzione combinata di energia elettrica e calore azionati da motori a combustione interna – Metodi di prova in campo.

Risultano in fase di elaborazione altri cinque progetti di norma che riguardano l'offerta, l'ordinazione, il collaudo, l'accettazione, le

garanzie, nonché i criteri di valutazione tecnico-economici degli impianti di cogenerazione.

La norma UNI 8887 del febbraio 1987 prevede la seguente definizione di processo di cogenerazione: “Si definisce processo di cogenerazione l’insieme delle operazioni volte alla produzione combinata di energia meccanica/elettrica e calore, entrambi considerati effetti utili, partendo da una qualsivoglia sorgente di energia. Il processo di cogenerazione deve realizzare un più razionale uso dell’energia primaria rispetto a processi che producono separatamente le due forme di energia. La produzione di energia meccanica/elettrica e calore deve avvenire in modo sostanzialmente interconnesso in cascata.”

Nella normativa internazionale, l’Unione internazionale dei produttori e distributori di energia elettrica (UNIPEDA) definisce come “Centrale di produzione combinata di energia elettrica e calore (cogenerazione) un impianto termoelettrico in cui l’energia sviluppata dal combustibile è trasmessa ad un fluido intermedio immesso normalmente nella sua totalità in gruppi generatori; questi sono progettati e realizzati in modo che l’energia venga utilizzata in parte per farli funzionare per produrre energia elettrica ed in parte per assicurare una fornitura di calore per usi diversi: processi industriali, riscaldamento urbano, ecc.”

Come recitano tutte le definizioni e le normative relative alla cogenerazione appena viste, il processo di cogenerazione deve consentire un risparmio energetico significativo rispetto alla generazione separata dei due beni energetici prodotti, vale a dire energia elettrica e calore.

Ovviamente non è semplice ed immediato definire riferimenti adeguati per la generazione separata di calore e, soprattutto, di elettricità: si tenga presente le differenti tecnologie di produzione, tipologie di impianti e dimensioni.

E' utile tenere presente le definizioni di alcuni indici classici che identificano le prestazioni dei processi di cogenerazione:

- rendimento elettrico netto definito come rapporto tra l'energia elettrica netta prodotta e l'energia termica introdotta nel sistema con il combustibile, valutata con riferimento al potere calorifico inferiore (PCI);
- rendimento termico netto definito come il rapporto tra l'energia termica netta prodotta e l'energia termica introdotta nel sistema con il combustibile;
- rendimento totale o rendimento di primo principio definito come il rapporto fra gli effetti utili (somma di energia elettrica netta e calore) e l'energia termica introdotta con il combustibile.

Per valutare l'effetto utile complessivamente prodotto da un impianto di produzione combinata di energia elettrica e calore occorre tenere presente che l'energia elettrica e il calore presentano caratteristiche e vincoli diversi:

- dal punto di vista termodinamico, l'energia elettrica rappresenta una forma di energia pregiata, mentre l'energia termica presenta un valore inferiore, sia da un punto di vista tecnico che economico, e sostanzialmente dipendente dal livello termico: infatti partendo da calore ad alta temperatura è possibile ottenere più lavoro rispetto a quello conseguibile con il medesimo quantitativo di energia a più bassa temperatura;
- dal punto di vista dei vincoli tecnologici e dei costi di produzione, i rendimenti con cui è possibile produrre energia termica risultano, generalmente, notevolmente elevati rispetto a quelli con i quali è possibile ottenere energia elettrica, che risultano altresì

notevolmente differenziati in funzione della tecnologia utilizzata per la produzione di energia elettrica;

- dal punto di vista dei vincoli tecnologici e dei costi di trasporto, mentre l'energia elettrica può essere trasportata a grande distanza dai centri di produzione con perdite relativamente contenute, l'energia termica può essere trasportata ai centri di utilizzo solo su brevi distanze, a causa della rilevanza dei costi e delle perdite associate.

Per valutare da un punto di vista termodinamico le prestazioni di un impianto di produzione combinata di energia elettrica e calore si possono utilizzare due tipi di rendimenti:

a) il già citato rendimento di primo principio

$$\eta = \frac{E_e + E_t}{E_c} \quad (1.3-1)$$

Dove:

- E_e è l'energia elettrica netta generata dall'impianto di cogenerazione;
- E_t è l'energia termica netta utile generata dall'impianto di cogenerazione;
- E_c è l'energia primaria del combustibile, riferita al potere calorifico inferiore dello stesso, che alimenta l'impianto di cogenerazione.

b) il rendimento di secondo principio

$$\eta_{II} = \frac{E_e + E_t \cdot \left(1 - \frac{T_a}{T_{ml}}\right)}{E_c} \quad (1.3-2)$$

dove, oltre alle grandezze già definite:

- T_a è la temperatura dell'ambiente esterno;
- T_{ml} è la temperatura media logaritmica di cessione del calore all'utenza.

Si osserva che il rendimento di primo principio, non attribuendo pesi diversi all'energia termica e all'energia elettrica, appare inadeguato ai fini di una valutazione completa dell'efficienza di un impianto di cogenerazione.

Il rendimento di secondo principio tiene invece conto del livello termico associato all'energia termica e delle asimmetrie tra l'energia termica ed elettrica, ma risulta di difficile applicazione nei casi pratici (analisi exergetica).

Un altro indice è il rapporto di energia primaria (Primary Energy Ratio) PER, definito come il rapporto, a parità di energia elettrica netta e di energia termica utile generata, fra l'energia primaria che utilizzerebbe un sistema di riferimento basato su una metodologia convenzionale non cogenerativa ($\eta_{el,rif}$ e $\eta_{t,rif}$ sono i valori di riferimento per la generazione separata rispettivamente di elettricità e calore) e quella utilizzata dal sistema cogenerativo. Quando il PER è maggiore del valore unitario, significa che la generazione separata comporterebbe un maggior consumo di energia primaria, e quindi che il sistema di cogenerazione risparmia energia primaria:

$$PER = \frac{\frac{E_e}{\eta_{el,rif}} + \frac{E_t}{\eta_{t,rif}}}{E_c} \quad (1.3-3)$$

Il PER è un indice comparativo equivalente all'indice IRE (Indice di Risparmio di Energia) utilizzato diffusamente e descritto successivamente.

1.3.1 Il risparmio di energia derivante dalla cogenerazione

L'analisi del risparmio energetico attribuibile ad un impianto di cogenerazione richiede delle inevitabili schematizzazioni. Infatti, dovendo confrontare i consumi energetici di un impianto di cogenerazione con i consumi che si avrebbero per la produzione separata delle stesse quantità di energia elettrica e calore, si deve far riferimento alle modalità tecnico-produttive con le quali tali quantità di energia verrebbero generate separatamente. Per l'energia elettrica si può far riferimento al rendimento elettrico medio della modalità alternativa di produzione della sola energia elettrica (es. miglior tecnologia disponibile e commercialmente provata, oppure rendimento elettrico medio netto del parco termoelettrico nazionale). Per la produzione di calore si può fare riferimento al rendimento termico di una caldaia di taglia medio grande per le utilizzazioni industriali del calore e al rendimento termico medio del parco di caldaie medio piccole di tipo domestico per le utilizzazioni civili del calore.

Per chiarire il significato di risparmio energetico connesso ad un impianto di cogenerazione rispetto alla produzione separata delle medesime quantità di energia utile, si illustra l'esempio riportato nella seguente figura.

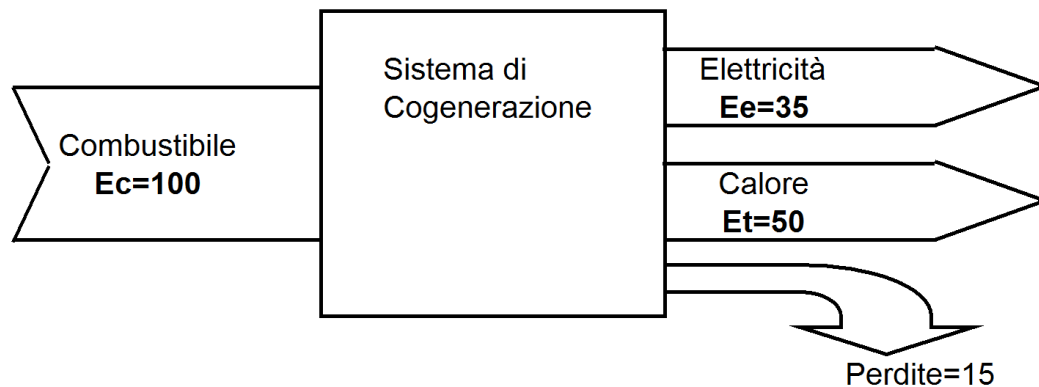


Figura 1.3.1-1 Produzione combinata di elettricità e calore

Supponendo che un impianto cogenerativo, per produrre 35 unità di energia elettrica e 50 unità di calore utile, consumi 100 unità di combustibile, il rendimento termodinamico complessivo di conversione, inteso come rapporto tra l'energia utile prodotta (35+50) e l'energia primaria del combustibile utilizzato (100), risulta dell'85%.

Se si considera invece il caso di produzione separata, supponendo di produrre 35 unità di energia elettrica con una centrale termoelettrica avente un rendimento elettrico del 49% e 50 unità di calore utile con una caldaia avente un rendimento termico pari al 90%, si avrebbe un consumo di combustibile pari a $35/0,49 + 50/0,9 = 127$ unità di combustibile. Nel caso di produzione separata delle stesse quantità di energia elettrica e calore, risulterebbe quindi un consumo di 127 unità di combustibile anziché le 100 richieste dall'impianto di cogenerazione.

Il risparmio di energia primaria conseguibile con la cogenerazione è dunque pari a $(127-100)/127 = 21,3\%$.

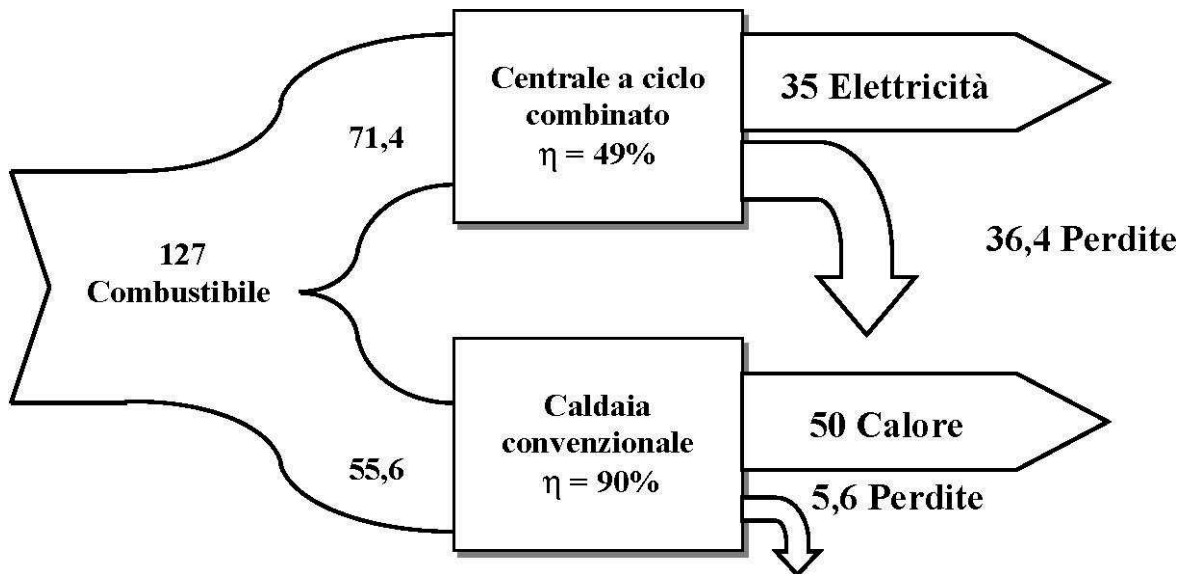


Figura 1.3.1-2 Produzione separata di elettricità e calore

1.3.2 L'indice di risparmio di energia IRE

L'indice IRE (Indice di Risparmio di Energia), uno tra i più diffusi indicatori utilizzati nella letteratura tecnica per valutare il risparmio di energia primaria di un impianto di produzione combinata di energia elettrica e calore, è definito come il rapporto fra il risparmio di energia primaria conseguito dalla sezione o dall'impianto di cogenerazione rispetto alla produzione separata delle stesse quantità di energia elettrica e termica e l'energia primaria richiesta dalla produzione separata. E' espresso dalla formula:

$$IRE = \frac{E_s + E_c}{E_s} = 1 - \frac{E_c}{E_s} = 1 - \frac{E_c}{E_{es} + E_{ts}} = 1 - \frac{E_c}{\frac{E_e}{\eta_{es}} + \frac{E_t}{\eta_{ts}}} \quad (1.3.2-1)$$

dove i simboli indicano:

- $E_s = E_{es} + E_{ts}$: l'energia primaria dei combustibili utilizzati per produrre separatamente elettricità e calore utile per mezzo di due

distinti impianti, uno per la produzione di energia elettrica e l'altro per la produzione di calore mediante caldaia industriale;

- Ees: l'energia primaria del combustibile utilizzato per produrre elettricità per mezzo di un impianto di sola produzione di energia elettrica, riferita al potere calorifico inferiore;
- Ets: l'energia primaria del combustibile utilizzato per produrre calore mediante una caldaia industriale;
- Ec: l'energia primaria dei combustibili, riferita al potere calorifico inferiore dei combustibili, consumata dall'impianto di cogenerazione per la produzione combinata delle stesse quantità di energia elettrica Ee e di energia termica utile Et;
- Ee: l'energia elettrica netta generata dall'impianto di cogenerazione;
- Et: l'energia termica netta utile generata dall'impianto di cogenerazione;
- η_{es} : il rendimento elettrico medio netto della modalità di sola generazione energia elettrica di riferimento;
- η_{ts} : il rendimento termico medio della modalità di sola generazione di energia termica di riferimento.

Per come è stato definito, se $IRE = 0$ le due soluzioni (produzione combinata di energia elettrica e calore e produzione da impianti separati) risultano equivalenti, se $IRE > 0$ la produzione combinata di energia elettrica e calore è la soluzione migliore, se infine $IRE < 0$ si risparmia ricorrendo agli impianti separati.

Scelti i due rendimenti di riferimento, è possibile rappresentare la relazione $IRE = 0$ sul piano $[Et/Ec; Ee/Ec]$ (figura 1.3.2-1): si osserva che le intercette della retta sull'asse delle ordinate e sull'asse delle ascisse evidenziano rispettivamente il rendimento elettrico di riferimento

η_{es} e il rendimento termico di riferimento η_{ts} . Un qualunque punto del piano rappresenta le condizioni di funzionamento di un impianto di produzione combinata di energia elettrica e calore, caratterizzato da un particolare valore dell'indice IRE.

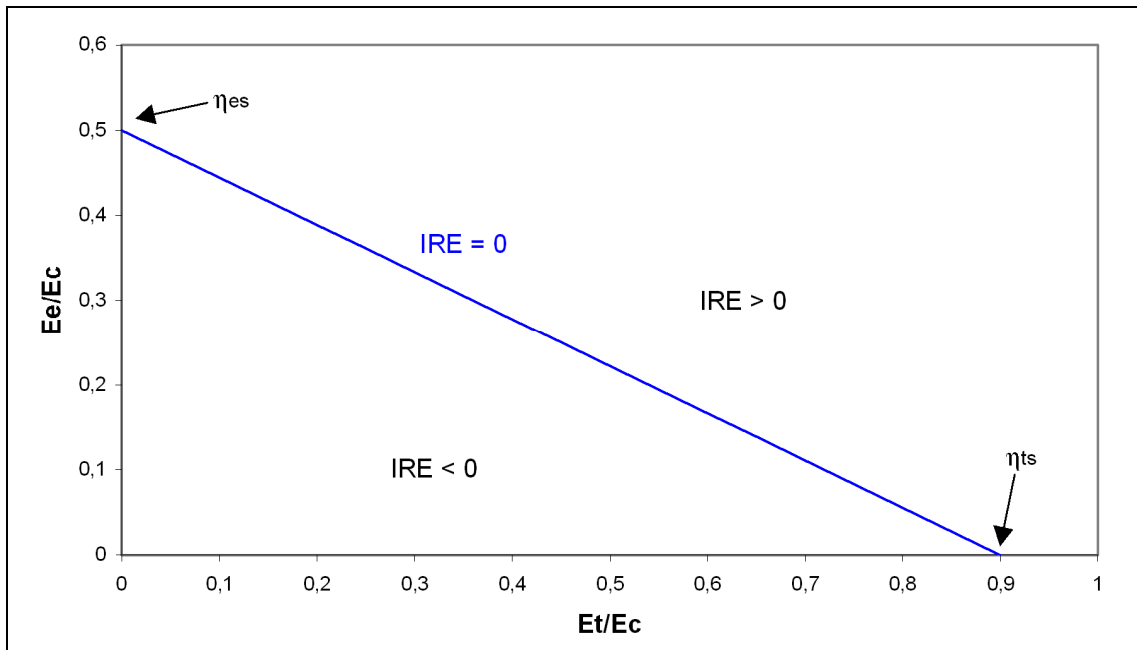


Figura 1.3.2-1: Retta corrispondente a $IRE=0$, calcolata con $\eta_{es}=0,50$ e $\eta_{ts}=0,90$

1.3.3 Il rendimento elettrico depurato o di Ecabert

Tra gli indicatori utilizzati per valutare il risparmio di energia primaria di un impianto di produzione combinata di energia elettrica e calore esiste il rendimento elettrico depurato η_{ed} , chiamato anche rendimento di Ecabert oppure FUE (fuel utilisation effectiveness):

$$\eta_{ed} = \frac{E_e}{E_c - \frac{E_t}{\eta_{ts}}} \quad (1.3.3-1)$$

Esso è definito come il rapporto tra l'energia elettrica prodotta e l'energia primaria del combustibile depurata della quantità di energia primaria necessaria per produrre la stessa quantità di energia termica. Et con un impianto termico separato, caratterizzato da un rendimento pari a η_{ts} , E' pertanto un indice che attribuisce alla sola produzione di energia elettrica il risparmio conseguibile in cogenerazione. Tale indice assume quindi che la produzione di energia termica, a differenza della produzione di energia elettrica, è obbligata, dovendo essere realizzata in prossimità del luogo di utilizzo a causa dei vincoli e delle difficoltà connesse al trasporto, e che la sua efficienza ha ormai raggiunto il limite assoluto.

Si osserva che le scritture $IRE > 0$ ed $\eta_{ed} > \eta_{es}$ si equivalgono se vengono scelti gli stessi valori dei rendimenti di riferimento η_{es} ed η_{ts} . Pertanto se $\eta_{ed} = \eta_{es}$ le due soluzioni (cogenerazione ed impianti separati) risultano equivalenti, se $\eta_{ed} > \eta_{es}$ la soluzione cogenerativa è la migliore, se infine $\eta_{ed} < \eta_{es}$ si risparmia ricorrendo agli impianti separati.

1.4 Tecnologie per la cogenerazione di energia elettrica e calore

La produzione combinata di energia elettrica e di calore può essere tecnicamente realizzata con le modalità *topping* e *bottoming*:

Nella modalità "topping" viene prodotta energia elettrica attraverso un ciclo termodinamico ad alta temperatura integrato ad un sistema di recupero in forma utile del calore di scarico e di distribuzione del medesimo all'utenza termica. In questo caso le tecnologie risultano sostanzialmente derivate da quelle utilizzate per la produzione di sola

energia elettrica attraverso l'installazione di apparecchiature di recupero termico e di distribuzione del calore a valle dei motori primi.

Nella modalità "bottoming" viene prima prodotto calore per utilizzazioni ad alta temperatura, il cui cascame termico alimenta un ciclo termodinamico sottostante che permette di ottenere anche una produzione di energia elettrica.

La maggior parte dei processi di produzione combinata di energia elettrica e di calore sono di tipo "topping". Gli impianti "bottoming" esistono nell'industria pesante come quella del vetro o dei metalli, dove vengono impiegati forni ad alta temperatura. Una caldaia recupera il calore di scarto dal processo manifatturiero e serve a produrre vapore che alimenta una turbina a vapore, che a sua volta genera elettricità.

Da un punto di vista impiantistico le tecnologie di produzione combinata di energia elettrica e di calore vengono classificate in base alla tipologia dei motori primi utilizzati. Ciascuna tecnologia presenta un rapporto tra le quantità di energia elettrica E_e e di calore utile E_t prodotte, definito indice elettrico K , che presenta valori tipici per ciascuna tipologia impiantistica che oscillano in un intervallo ampio. Le diverse tipologie impiantistiche risultano anche molto differenziate sotto il profilo delle caratteristiche di elasticità di tale indice rispetto alla domanda.

Le tecnologie di produzione combinata di energia elettrica e di calore si sono dapprima sviluppate a partire dagli impianti termoelettrici a vapore basati sul ciclo termodinamico Rankine.

In questi impianti il rendimento termodinamico aumenta, tra l'altro, al diminuire della temperatura della sorgente fredda, ovvero al diminuire delle condizioni di pressione e temperatura del vapore allo scarico della turbina nel condensatore. I processi industriali con fabbisogni di calore utile a media temperatura (120-250°C) hanno modificato le condizioni di

scarico del vapore, riducendo la produzione di energia elettrica ma incrementando il rendimento globale di conversione dell'energia primaria del combustibile, generando due tipologie impiantistiche derivate dai cicli Rankine a vapore:

- **impianti a vapore a contropressione**, nei quali la turbina a vapore scarica in reti esercite a pressione superiore a quella atmosferica;
- **impianti a vapore a condensazione con spillamento**, nei quali il prelievo di vapore per usi tecnologici o di riscaldamento è parziale ed effettuato durante la fase di espansione in turbina.

I primi si caratterizzano per elevati valori di recupero energetico rispetto alla produzione separata e per un elevato rapporto tra le quantità di energia termica prodotta rispetto a quella elettrica.

I secondi presentano rendimenti di conversione dell'energia primaria del combustibile simili a quelli di un impianto termoelettrico convenzionale. Nel 1986 più del 97% della potenza elettrica installata in Italia di impianti con produzione combinata di energia elettrica e di calore (4505 MW) era costituito da impianti termoelettrici con ciclo a vapore di tipo Rankine. La parte residua era rappresentata da:

- **motori a combustione interna**, sia a ciclo Otto che Diesel;
- **turbine a gas** con caldaie a recupero.

Queste due tipologie impiantistiche consistono nel recupero, attraverso scambiatori di calore o caldaie a recupero, dell'energia termica del sistema di raffreddamento o dei gas di scarico e presentano rendimenti di conversione dell'energia primaria del combustibile sono dell'ordine del 60-70%, confrontabili a quelli degli impianti a vapore a contropressione, anche se le applicazioni riguardano solitamente taglie relativamente piccole e medie. Poiché il recupero di energia termica non influenza e

non diminuisce (significativamente) la produzione elettrica, si possono avere rapporti tra energia termica utile ed energia elettrica prodotta piuttosto ampi.

Dalla fine degli anni '70 hanno trovato sempre maggiore applicazione gli **impianti a ciclo combinato** nei quali coesistono, in cascata, un ciclo Brayton (turbina a gas) con un ciclo Rankine a vapore. I gas di scarico delle turbine a gas alimentano con il loro calore residuo una caldaia a recupero (o HRSG-Heat Recovery Steam Generator), che può anche essere dotata di un sistema di combustione supplementare o di post-combustione (Supplementary Fired). Il vapore generato dalla caldaia a recupero alimenta un turbogruppo a vapore. Per ciascun gruppo o blocco combinato sono possibili diverse combinazioni tra il numero delle turbine a gas per ciascuna turbina a vapore (2:1, 3:1, 1:1 in configurazioni sia a più assi che mono-asse).

In generale gli impianti a ciclo combinato sono destinati alla sola produzione di energia elettrica e rappresentano una delle soluzioni più efficienti, con rendimenti nominali per le taglie maggiori superiori al 55%, con obiettivi a medio termine del 60%. Il ciclo combinato può anche essere destinato alla produzione combinata di energia elettrica e di calore a seconda che l'HRSG o la turbina a vapore abbiano derivazioni per destinazioni termiche utili. La diffusione dei cicli combinati determina un radicale mutamento nelle modalità applicative della produzione combinata di energia elettrica e di calore: mentre nei tradizionali cicli a vapore con turbine a contropressione prevale la produzione di energia termica su quella elettrica e, nel caso dei motori a combustione interna o dei turbogas con caldaia a recupero, tali produzioni risultano relativamente indipendenti, negli impianti a ciclo combinato risulta predominante la produzione di energia elettrica,

ponendo quindi, in generale, problemi di cessione dell'energia elettrica alla rete. Ciò vale anche nell'ipotesi di riqualificazione dei vecchi cicli a vapore attraverso la conversione in ciclo combinato degli impianti a vapore esistenti con riutilizzazione del macchinario rotante esistente.

Vanno infine menzionate le applicazioni cogenerative delle **celle a combustibile**. Le celle a combustibile producono energia elettrica attraverso l'ossidazione diretta di un combustibile, normalmente gas naturale o idrogeno, e sono classificate in base al tipo di elettrolita utilizzato. La cella ad acido fosforico è la più diffusa nelle applicazioni di taglia medio-piccola e presenta rendimenti elettrici del 40% e globali, in applicazioni combinate, dell'82%, con acqua calda a 90°C o vapore saturo a 115-120°C come vettore termico. Nella cella a carbonati fusi i rendimenti raggiungono, rispettivamente, il 55% e il 70% ed operano a temperatura elevata (650°C). Nella cella a ossidi solidi, ancora in fase di industrializzazione, si raggiungono temperature dell'ordine di 1100°C, rendendo possibile la combinazione con cicli combinati che raggiungono rendimenti globali del 70%.

Gli impianti di produzione combinata di energia elettrica e di calore presentano, mediamente, gli indici di efficienza e gli indici elettrici riportati nella seguente figura.

Tavola 1 – Valori indicativi del rendimento elettrico, totale e dell'indice elettrico per le diverse tipologie impiantistiche di produzione combinata di energia elettrica e calore

SISTEMA	[Ee/Ec] %		TOTALE [(Ee+Et)/Ec] %	ELETTRICO (*) K = Ee/Et
	CARICO 100%	CARICO 50%		
Turbine a vapore	14-35	12-28	60-85	0,1-0,5
Turbine a gas in ciclo aperto	25-40	18-30	60-80	0,5-0,8
Turbine a gas in ciclo chiuso	30-35	30-35	60-80	0,5-0,8
Cicli combinati	35-45	25-35	70-88	0,6-2,0
Motori Diesel	35-45	32-40	60-85	0,8-2,4
Motori alternativi a combustione interna	27-39	25-34	60-79	0,5-0,6
Celle a combustibile	37-70	37-45	85-90	0,8-1,0
Motori Stirling	35-50	34-49	60-80	1,2-1,7

Dati liberamente tratti dal testo "Educogen: The European Educational Tool on Cogeneration", dicembre 2001, disponibile al sito internet www.cogen.org

(*) Valori degli indici elettrici **che possono essere ritenuti** indicativi della condizione di massimo recupero termico a pieno carico.

Figura 1.4-1 Valori caratteristici per le diverse tipologie impiantistiche (fonte: Relazione Tecnica della delibera AEEG 42/02)

I valori indicativi della condizione di massimo recupero termico a pieno carico per l'indice elettrico $K=Ee/Et$ degli impianti di produzione combinata di energia elettrica e calore risultano prossimi o di poco superiori all'unità.