

• POSSIBILI APPLICAZIONI DI UNA TECNOLOGIA ANCORA POCO CONOSCIUTA

Trigenerazione, fare freddo con il calore di scarto

Un impianto di trigenerazione, oltre a produrre energia elettrica, recupera in parte o totalmente l'energia termica generata per trasformarla in energia frigorifera

di Mario Baldini,
Patrizia Simeoni,
Alessandro Mattiussi

Per cogenerazione, denominata anche Chp (Combined heat and power), si intende la produzione contemporanea di energia elettrica e calore, considerati entrambi effetti utili, partendo da una sorgente di energia primaria mediante un unico sistema (figura 1). In altre parole la cogenerazione consiste nell'impiego utile del calore scaricato da un ciclo di potenza, che risulterebbe altrimenti inutilizzato. La riduzione di tale reflu termico consente la sostanziale diminuzione, a parità di servizio reso all'utenza, dei consumi di energia primaria. L'entità del risparmio varia a seconda delle tecnologie impiegate e delle condizioni di utilizzo dell'energia elettrica e del calore prodotti. In via approssimativa tale risparmio può essere stimato attorno al 35-40%. Chiariamo i concetti appena esposti con un esempio. Se si utilizzano 100 unità

di combustibile in un impianto di cogenerazione, si ottengono circa 30 unità di energia elettrica e 55 unità di energia termica; per ottenere la stessa quantità di energia prodotta utilizzando impianti convenzionali, che generano separatamente tali energie, sarebbero necessarie circa 61 unità di combustibile per la produzione di calore e 91 per la produzione di elettricità, per un totale di 152 unità di combustibile. Il sistema cogenerativo, in questo caso, consente quindi di risparmiare 52 unità di combustibile.

La trigenerazione, detta anche Chpc (Combined heating, cooling and power generation), rappresenta un particolare sviluppo dei sistemi di cogenerazione nei quali viene recuperata, per mezzo di cicli frigoriferi, quota parte o la totalità dell'energia termica generata per la produzione di energia frigorifera (figura 2).

Sistemi di trigenerazione

Gli elementi fondamentali di un sistema di trigenerazione, che ritroviamo in tutte le soluzioni impiantistiche, sono sostanzialmente due:

- il motore primo che attua la conversione dell'energia termica introdotta in energia meccanica, accoppiato a un generatore elettrico che trasforma l'energia meccanica in energia elettrica;
- una macchina frigorifera che attua la conversione dell'energia termica prodotta in energia frigorifera.

A questi va aggiunta una serie di impianti ausiliari che ne consente il corretto



Con apparecchiature come gli assorbitori a bromuro di litio è possibile condizionare gli edifici a partire dal calore dei generatori

funzionamento (sistemi di dissipazione, strumentazione di regolazione e controllo dell'impianto, sistemi di antinquinamento e di insonorizzazione, ecc.).

Motori primi

I motori primi utilizzati per la cogenerazione o trigenerazione possono essere suddivisi in due classi.

A un grado di libertà. Per i motori primi a un grado di libertà, la definizione della potenza elettrica fissa necessariamente anche la potenza termica (o viceversa). Tra questi si annoverano

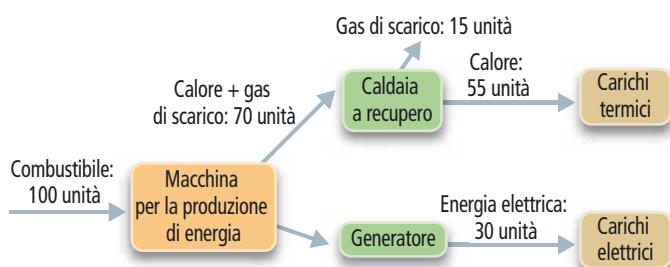


FIGURA 1 - Comparazione tra cogenerazione e sistema di produzione di energia convenzionale

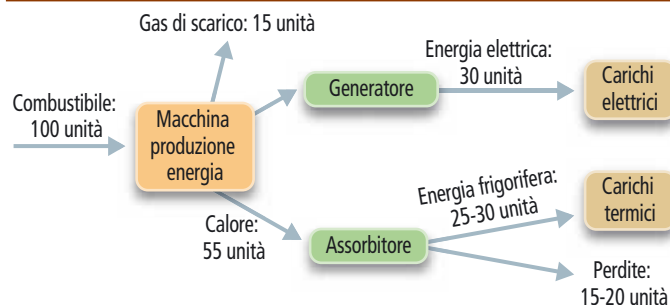


FIGURA 2 - Schema di produzione energetica della trigenerazione

i motori alternativi, le turbine a gas, le turbine a vapore a controcompressione e i cicli combinati con turbina a vapore a controcompressione.

A due gradi di libertà. Per i motori primi a due gradi di libertà il rapporto elettricità/calore generato può variare entro un campo molto ampio. In questo caso, potenza elettrica e termica generate possono essere fissate, entro certi limiti, indipendentemente l'una dall'altra. Tra questi ricordiamo le turbine a vapore a condensazione e spillamento, i cicli combinati con turbina a vapore a spillamento e le turbine a gas a iniezione di vapore.

Ciascuna tipologia di impianto è caratterizzata da un suo specifico campo di applicazione, all'interno del quale si realizzano i massimi rendimenti termodinamici e/o la massima convenienza economica. Le principali caratteristiche tecniche sono riportate in *tabella 1*; vantaggi e svantaggi sono esposti nel riquadro a pag. 16

Fra queste macchine, i motori alternativi costituiscono la tecnologia a oggi dominante nel campo delle piccole potenze grazie alla loro flessibilità, affidabilità, modularità e grazie ai buoni rendimenti elettrici. La classificazione più naturale di questi motori dipende dal tipo di ciclo termodinamico realizzato. Si distinguono i motori a ciclo otto (ad accensione comandata), nei quali la fase di combustione avviene in seguito all'innescamento di combustibile, e i motori diesel (ad accensione spontanea), nei quali la fase di combustione avviene a pressione senza necessità di innesco.

Indipendentemente dal ciclo che realizzano, le possibilità di recupero di calore potenzialmente impegnabile per la cogenerazione e trigenerazione nei mo-

ALCUNI ESEMPI

Campi di applicazione

Le applicazioni per l'impianto di trigenerazione sono le stesse della cogenerazione, con particolare riferimento a quelle utenze dove è costante il fabbisogno di energia in tutte le sue forme (calore, elettricità, freddo), richieste energetiche che possono presentarsi sia separatamente, per esempio in relazione ai cicli stagionali, sia contemporaneamente. Alcuni esempi di utenze di questo tipo spaziano dal settore civile e terziario (utenze residenziali, ospedali, aeroporti, centri commerciali, ecc.) al settore industriale (settore alimentare, ecc.).

tori sono 4: gas di scarico, acqua di raffreddamento del motore, olio di lubrificazione e aria di sovralimentazione. Le caratteristiche di temperature e i possibili recuperi in termini percentuali sono riportati in *tabella 2*, dalla quale si desume che il calore recuperabile a bassa temperatura si aggira attorno al 25% dell'input termico, a fronte del 30-35% disponibile nei gas di scarico.

Macchine frigorifere ad assorbimento

Il gruppo frigorifero, ovvero l'apparato che produce freddo utilizzando il calore del processo di cogenerazione, costituisce una parte fondamentale dell'impianto di trigenerazione. Nella sua forma più semplice una macchina ad assorbimento è costituita da: un evaporatore, un assor-

bitore, un condensatore, un generatore e dispositivi di pompaggio e controllo. Il fluido refrigerante del ciclo è una miscela: generalmente acqua (solvente/refrigerante) e bromuro di litio (soluto), oppure ammoniaca (solvente/refrigerante) e acqua (soluto).

La scelta del liquido refrigerante viene effettuata in base all'applicazione: l'acqua-ammoniaca è impiegata nel caso di refrigerazione industriale con temperature di evaporazione al di sotto di 0 °C, mentre la coppia acqua-bromuro di litio è usata per applicazioni di condizionamento in cui le temperature richieste sono più elevate. L'efficienza di una macchina frigorifera ad alimentazione termica viene misurata attraverso il coefficiente termico di prestazione (C_{op}), definito come rapporto tra il calore assorbito dal ciclo frigorifero attraverso l'evaporatore e il calore richiesto per far funzionare il ciclo stesso. Le macchine standard, qualora vengano sfruttate tutte le opportunità di recupero del calore, presentano un coefficiente di prestazione pari a circa 0,7 per il sistema acqua-bromuro di litio e intorno a 0,6 per il sistema ammoniaca-acqua. Il coefficiente termico di prestazione può essere significativamente migliorato utilizzando i sistemi bistadio che hanno il coefficiente termico di prestazione pari a 1,1-1,2. La differenza è spiegata dal fatto che mentre i gruppi monostadio funzionano ad acqua calda a 90-95 °C (o vapore saturo 0,5 bar), quelli bistadio necessitano di vapore a 8 bar a 170 °C.

Vantaggi

Il ricorso alla pratica trigenerativa consente di ottenere i seguenti vantaggi.

TABELLA 1 - Caratteristiche tecniche delle tipologie d'impianto

	Turbina a vapore	Motore diesel	Motore a gas naturale	Turbina a gas	Microturbina
Efficienza energetica (%)	15-38	35-50	25-35	15-35	18-27
Efficienza globale (%)	80	70-80	80-85	70-85	65-75
Efficienza elettrica effettiva (%)	75	70-80	70-80	50-70	50-70
Taglie tipiche (MWe)	2-80	0,05-50	0,05-10	1-500	0,03-0,35
En. elettrica/en. termica	0,1-0,3	0,5-1,0	0,7-1,0	0,5-1,0	0,4-0,7
Funzionamento carico parziale	possibile	buono	possibile	scarso	possibile
Disponibilità (%)	circa 100	90-95	92-97	90-98	90-98
Costo di installazione (dollari/kW _e)	300-900	900-1.500	900-1.500	800-1.800	1.300-2.500
Costo di gestione (dollari/kWh _e)	< 0,004	0,005-0,015	0,007-0,02	0,003-0,0096	0,01
Tempo di avviamento	1 ora-1 giorno	10 secondi	10 secondi	10 minuti-1 ora	1 minuto
Pressione combustibile (psi)	-	< 5	45-75	120-500	40-100
Combustibili utilizzabili	tutti	diesel, oli esausti	gas naturale, biogas, propano, gas di scarica	gas naturale, biogas, propano, olio combustibile	gas naturale, biogas, propano, olio combustibile
Rumorosità	alta	alta	alta	moderata	moderata
Utilizzi dell'energia termica	vapore a bassa o alta pressione	acqua calda, vapore a bassa pressione	acqua calda, vapore a bassa pressione	acqua calda o surriscaldata, vapore a bassa o alta pressione	acqua calda o surriscaldata, vapore a bassa pressione
Densità energetica (kW/m ²)	> 100	35-50	35-51	20-500	5-70

Vantaggi e svantaggi delle diverse tipologie d'impianto

	Vantaggi	Svantaggi	Taglie disponibili
Turbina a vapore	<ul style="list-style-type: none"> elevata efficienza globale, può utilizzare qualsiasi combustibile alta affidabilità e tempi lunghi di esercizio 	<ul style="list-style-type: none"> avviamento lento basso rapporto en. elettrica/en. termica 	da 50 kW a 250 MW
Motori alternativi a ignizione diretta	<ul style="list-style-type: none"> elevata efficienza associata a flessibilità di parzializzazione del carico costi di investimento relativamente ridotti tempi di avviamento molto brevi utilizzabili in modo isolato con buone capacità di inseguimento del carico 	<ul style="list-style-type: none"> emissioni relativamente alte cogenerazione limitata ad applicazioni a bassa temperatura necessità di smaltire il calore quando questo non è recuperato elevati costi di manutenzione alti livelli di rumorosità alle basse temperature 	alte velocità (1.200 rpm) < 4 MW
Motori alternativi ad accensione per compressione diesel	<ul style="list-style-type: none"> possono essere revisionati <i>in loco</i> dai normali operatori operano con gas a bassa pressione 		basse velocità (60-75 rpm) < 0,5 MW
Microturbina	<ul style="list-style-type: none"> numero ridotto di parti in movimento dimensioni compatte e basso peso ridotte emissioni sistemi di raffreddamento non necessari 	<ul style="list-style-type: none"> costi elevati efficienza meccanica relativamente bassa cogenerazione limitata ad applicazioni a bassa temperatura 	da 30 kW a 350 kW
Turbina a gas	<ul style="list-style-type: none"> alta affidabilità basse emissioni calore disponibile ad alta temperatura sistemi di raffreddamento non necessari 	<ul style="list-style-type: none"> richiesta di gas ad alta pressione basse efficienze a basso carico 	da 500 kW a 400 MW

• Un miglioramento dei rendimenti globali di utilizzo e quindi una diminuzione dei consumi (a parità di potenza) delle fonti energetiche tradizionali (idrocarburi), limitando la dipendenza dei Paesi industrializzati dai Paesi esportatori di petrolio meglio conosciuti come Opec (Organization of the petroleum exporting countries), dipendenza che in questi ultimi anni, dato il costo sempre crescente dei combustibili derivati dal petrolio, si è rivelata particolarmente pesante.

• Un maggior utilizzo, in termini di ore, dell'impianto: il recupero del calore per la produzione di freddo consente un aumento delle ore di funzionamento annue, e, con queste, crescono notevolmente anche i risparmi conseguibili, mentre si riducono i tempi di recupero dell'investimento.

• Una maggiore salvaguardia ambientale: visto che con i sistemi trigenerativi, a parità di energia utile ricavata, si impiega una minore quantità di combustibile, le emissioni di CO₂ in atmosfera vengono notevolmente ridotte, contribuendo ad adempiere alle riduzioni imposte dal protocollo di Kyoto.

• La riduzione dell'impatto ambientale e dei costi dovuti alle realizzazioni della centrale tecnologica.

• La riduzione delle perdite di distribuzione dell'energia elettrica, termica e frigorifera resa possibile dalla vicinanza dei luoghi di produzione con quelli di utilizzo della stessa.

Svantaggi

L'applicazione pratica del concetto apparentemente semplice di cogenerazione può diventare difficoltosa (e ancor più la trigenerazione), se non impossi-

bile, a causa delle seguenti circostanze:

- le utenze assorbono energia elettrica, calore e freddo con leggi sostanzialmente indipendenti e, considerando che l'elettricità non è praticamente accumulabile e il calore e il freddo lo sono solo per brevi periodi, la trigenerazione è proponibile solo quando le domande di energia sono contemporanee;

- poiché, a seconda della soluzione impiantistica adottata, i massimi rendimenti di un impianto cogenerativo-trigenerativo si attuano intorno a un determinato valore del rapporto energia elettrica/energia termica/energia frigorifera, è necessario che la domanda di elettricità e calore da parte dell'utenza si collochi all'interno del campo di valori del rapporto caratteristico della macchina impiegata;

- sotto il profilo logistico, affinché si realizzi una convenienza economica per l'impianto, le utenze termiche, elettriche e frigorifere devono trovarsi nelle vicinanze del sistema di generazione energetica, in particolare per quanto

riguarda la rete di distribuzione del calore e del freddo;

- la cogenerazione si presenta vantaggiosa quando la domanda di calore è a bassa temperatura, vantaggio di entità tanto maggiore quanto più bassa risulta tale temperatura. Tali vantaggi vengono a mancare quando le temperature del vettore energetico termico sono relativamente elevate (il limite di tali temperature dipende dal sistema cogenerativo adottato);

- il sistema cogenerativo si dimostra economicamente e tecnicamente vantaggioso solo se la potenza richiesta dall'utenza supera una determinata soglia minima, variabile con la tipologia costruttiva dell'impianto stesso. Da ciò discende la necessità di eseguire preliminarmente un'accurata analisi del sistema energetico in esame, l'individuazione dell'entità e della variabilità dei prelievi, la distribuzione delle utenze.

Al di là delle limitazioni di natura tecnica, la diffusione dei sistemi cogenerativi, e ancor più di quelli trigenerativi, è stata finora ostacolata soprattutto dagli alti costi iniziali di impianto imputabili alla maggiore complessità di tali sistemi, se confrontati con i costi dei sistemi tradizionali.

Da questo punto di vista la complessità dell'impianto è tanto più insostenibile quanto minore è la potenzialità dell'impianto stesso.

• **Mario Baldini**

Dipartimento di scienze agrarie e ambientali
Università di Udine
baldini@uniud.it

Patrizia Simeoni

Alessandro Mattiussi

Dipartimento di energetica e macchine
Università di Udine

TABELLA 2 - Temperatura e recupero di calore dei fluidi operativi

Fluido operativo	Calore (%)	Temperatura (°C)
Gas di scarico	30-35	400-500
Acqua di raffreddamento motore	10-20	75-89
Aria di sovralimentazione (nel caso di motori turbocompressi)	13-25	130-150
Olio di lubrificazione	4-7	75-85

Il calore recuperabile a bassa temperatura si aggira attorno al 25% dell'input termico, a fronte del 30-35% disponibile nei gas di scarico.