



Certificazione Energetica Regione Lombardia
Soluzioni progettuali e costruttive per il
miglioramento dell'efficienza energetica degli
impianti, con particolare riguardo alle soluzioni
innovative suggerite dalla legislazione vigente

Giancarlo Chiesa

I cicli termodinamici

Il **primo principio** della termodinamica esprime la **conservazione dell'energia** nelle sue diverse forme, in particolare **calore** e **lavoro**, senza stabilirne una differenza qualitativa e senza fare distinzioni fra quantità di calore disponibili a temperature diverse.

Il **secondo principio** è il principio della degradazione dell'energia e stabilisce la **non equivalenza delle diverse forme di energia** ai fini di ottenere lavoro meccanico (energia elettrica), fissando precisi vincoli.

Si può sintetizzare dicendo che il primo principio stabilisce la equivalenza metrologica fra calore e lavoro, mentre il secondo principio ne stabilisce la non equivalenza operativa.

Poiché In Italia circa l' 80% dell'energia, termica ed elettrica, consumata viene prodotta con fonti fossili, **la conoscenza delle leggi della termodinamica e dei vincoli che esse pongono** alla possibilità di trasformare il contenuto energetico dei combustibili in lavoro meccanico e poi in energia elettrica, è indispensabile perché **consente di indirizzare le scelte per l'uso corretto delle risorse.**

I cicli termodinamici

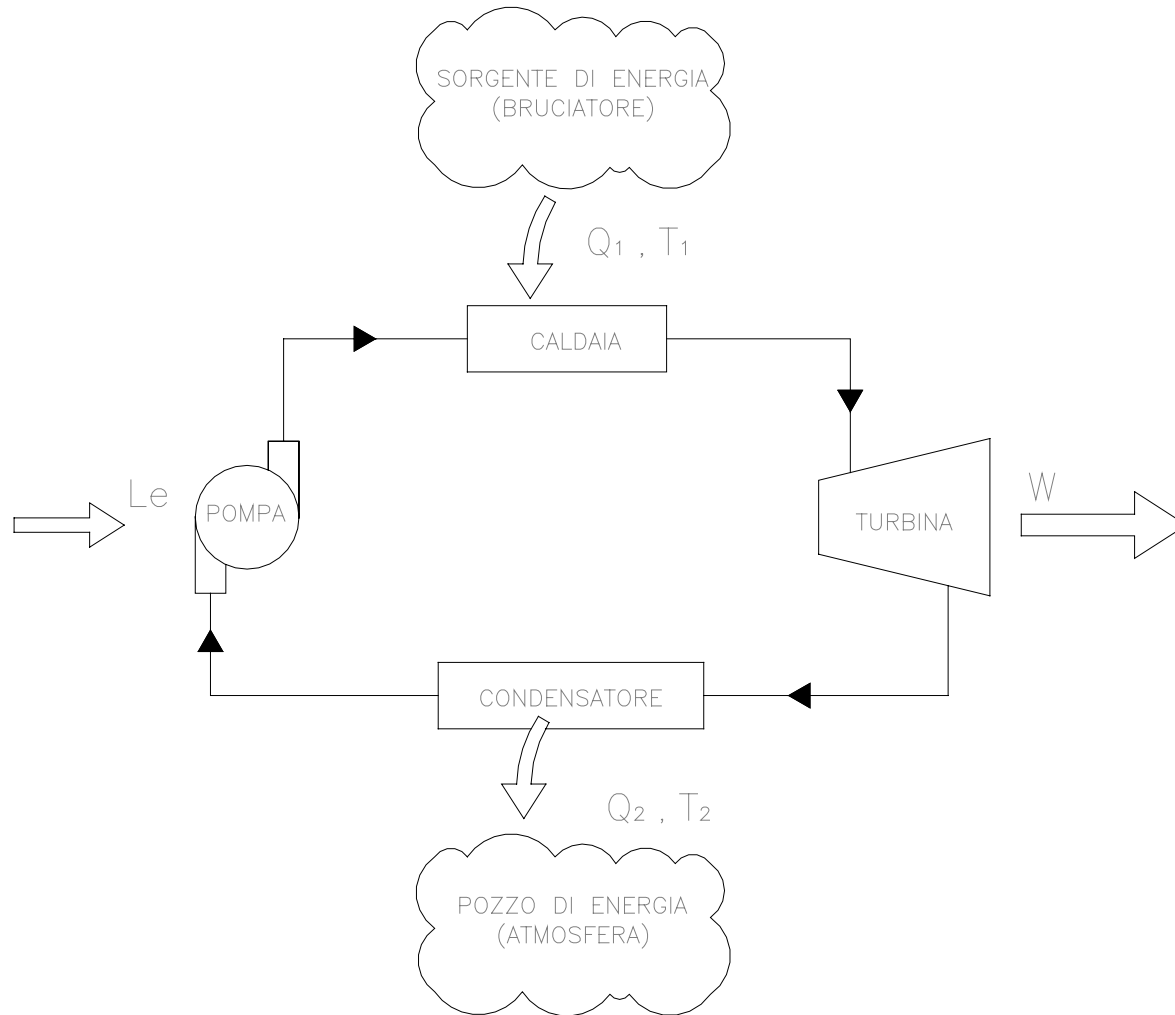
L'energia immagazzinata nel sistema in forme diverse (potenziale, chimica, etc.) **può essere convertita in energia elettrica quando esiste una differenza di potenziale**, che può essere definito come la proprietà intensiva che è caratteristica del particolare fenomeno ed indica il verso di evoluzione spontanea del sistema.

Se la tendenza del processo spontaneo, determinata da una differenza di potenziale, viene opportunamente guidata, è possibile ottenere **lavoro meccanico (energia elettrica)**; **quando si vuole trasformare energia termica**, ottenuta ad esempio dalla ossidazione di combustibili fossili, **in energia elettrica** si devono realizzare **“cicli termodinamici”** che operano tra **due sorgenti** (pozzi, serbatoi) a temperatura diversa.

L'energia termica, semplicemente trasferita ad un sistema a temperatura più bassa, **si degrada**, perde qualità; **se però il calore in transito da una sorgente a più alta temperatura ad una a temperatura inferiore, venisse prima immesso in un ciclo termodinamico una parte potrebbe essere trasformata in lavoro meccanico.**

Non tutto il calore disponibile alla temperatura T_1 può essere trasformato in lavoro meccanico

I cicli termodinamici



Ciclo diretto e rendimento

$$\eta = W / Q_1 = (Q_1 - Q_2) / Q_1 = 1 - (Q_2 / Q_1) = 1 - (T_1 - T_2)$$

I cicli termodinamici

Il valore del rendimento è sempre minore di uno, perché la quantità di calore ceduta alla sorgente che si trova a temperatura T_2 è sempre maggiore di zero.

Questo vincolo è il secondo principio della termodinamica che si può esprimere in diversi modi:

- **il calore passa spontaneamente da un corpo ad un altro che si trova a temperatura inferiore;**
- **non tutto il calore (Q_1) scambiato ad alta temperatura (T_1) può essere trasformato in lavoro, una parte (Q_2) deve essere ceduta al serbatoio a temperatura T_2 .**

Il valore minimo di temperatura del serbatoio freddo è quello dell'ambiente ed è nell'ambiente dunque che viene scaricato il calore non trasformabile in energia meccanica.

I cicli termodinamici

Si può anche immaginare di effettuare **un ciclo**, anch'esso reversibile, **col fluido termodinamico che percorra le stesse trasformazioni, ma in senso inverso**; la quantità di calore (Q_2) viene trasmessa dal serbatoio a temperatura T_2 al fluido termodinamico e la quantità (Q_1) dal fluido al serbatoio a temperatura T_1 , questo processo è possibile se si compie del lavoro meccanico .

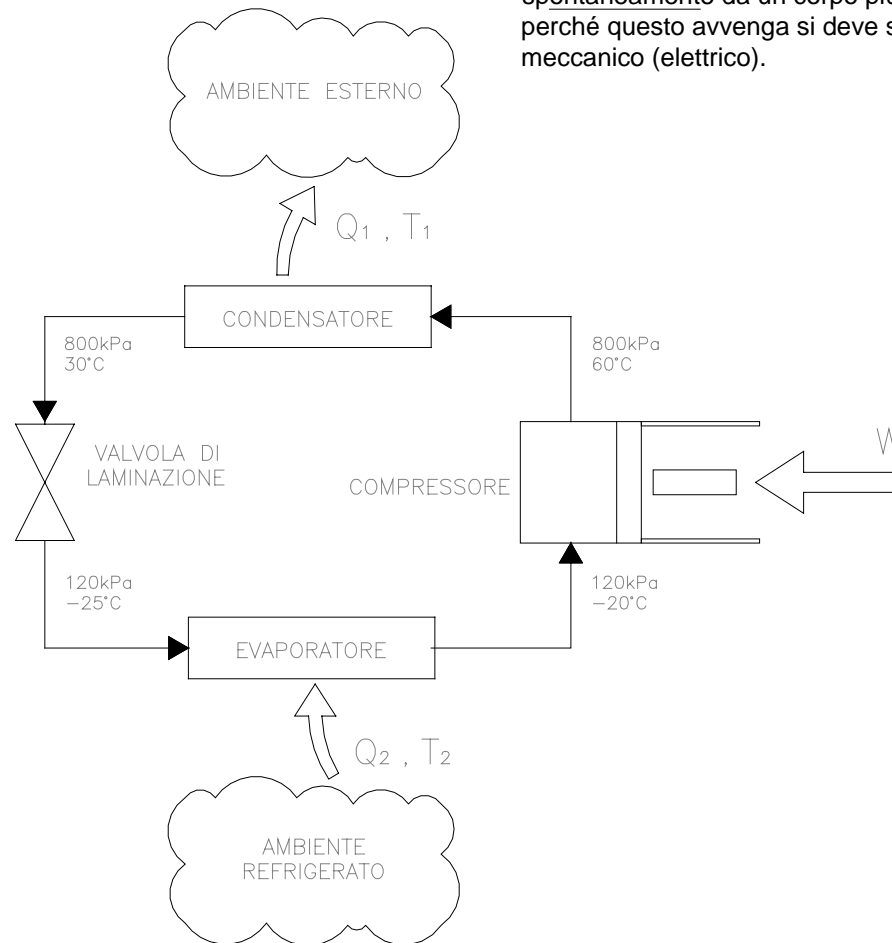
Il risultato del ciclo inverso è che viene trasferito del calore dal serbatoio a bassa temperatura a quello ad alta temperatura a spese del lavoro meccanico fornito.

Se l'obiettivo è quello di sottrarre calore dalla sorgente fredda (ad esempio una cella frigorifera da mantenere a bassa temperatura) si tratta del tradizionale **ciclo frigorifero**.

Se l'obiettivo è invece quello di prelevare calore (Q_2) da una sorgente a bassa temperatura e trasferire calore (Q_1) ad un'altra sorgente a temperatura più elevata il sistema agisce come **pompa di calore**; in entrambi i casi è necessario fornire al sistema del lavoro meccanico (W).

I cicli termodinamici

Enunciato di Clausius del secondo principio: "non è possibile realizzare una trasformazione il cui unico risultato sia quello di far passare del calore da un corpo più freddo ad un corpo più caldo, oppure il calore fluisce spontaneamente da un corpo più caldo ad uno più freddo", perché questo avvenga si deve spendere del lavoro meccanico (elettrico).



Schema ciclo inverso e COP

$$\text{COP}_f = Q_2 / W = Q_2 / (Q_1 - Q_2) = T_2 / (T_1 - T_2)$$

$$\text{COP}_{\text{pdc}} = Q_1 / W = Q_1 / (Q_1 - Q_2) = T_1 / (T_1 - T_2)$$

I cicli termodinamici

E' importante, indipendentemente dalle irreversibilità insite in ogni processo reale, **stabilire quale sia l'energia non utilizzabile per compiere lavoro meccanico (energia elettrica) quando il calore disponibile ad alta temperatura non venga direttamente trasferito al fluido operante all'interno del ciclo termodinamico.**

Consideriamo un sistema costituito da un serbatoio di calore a temperatura T_1 immerso in un ambiente a temperatura T_0 , inferiore a T_1 e costante.

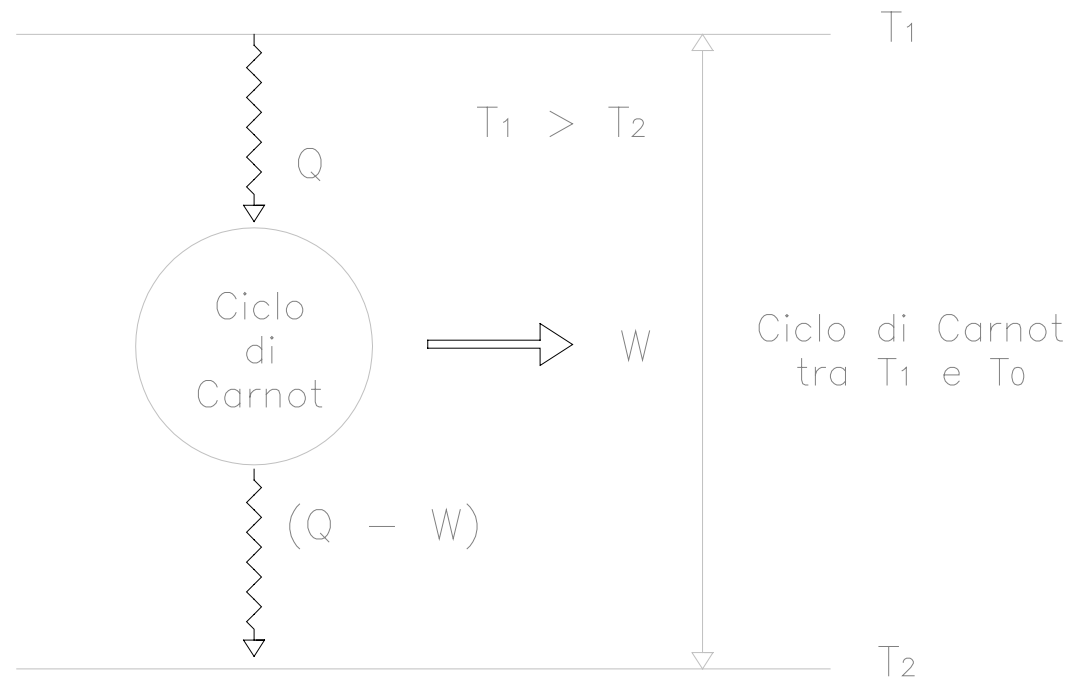
L'ambiente a temperatura T_0 rappresenta il secondo serbatoio di calore.

Un primo ciclo reversibile lavora tra questi due serbatoi, rispettivamente a temperatura T_1 , che cede il calore Q al fluido termodinamico, e T_0 , producendo il lavoro W .

I cicli termodinamici

$$\eta = W/Q = 1 - (T_0 / T_1)$$

$$W_{\max} = Q (1 - T_0 / T_1)$$



Schema di un ciclo termodinamico di Carnot tra le temperatura T_1 e T_0

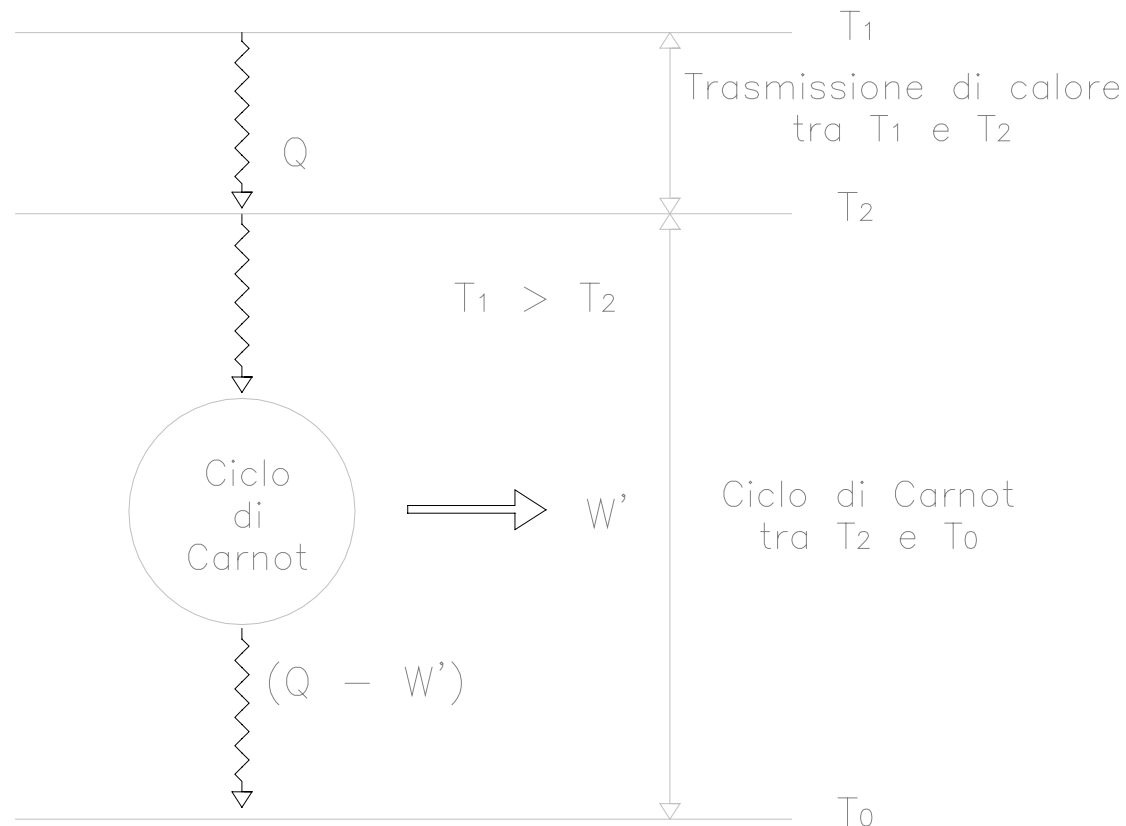
I cicli termodinamici

Supponiamo ora che la quantità di calore Q venga trasmessa dal serbatoio a temperatura T_1 ad un altro a temperatura T_2 , essendo $T_1 > T_2 > T_0$ e successivamente al ciclo di Carnot operante tra i due serbatoi di calore rispettivamente a temperatura T_2 e T_0 .

I cicli termodinamici

$$\eta' = W'/Q = 1 - T_0/T_2$$

$$W'_{\max} = Q (1 - T_0/T_2)$$



Trasmissione di calore da T_1 a T_2 e lavoro massimo ottenibile W'

I cicli termodinamici

L'energia che non viene trasformata in lavoro può essere calcolata come **differenza tra il lavoro ottenuto nel primo caso e quello ottenuto col secondo ciclo.**

$$\Delta W = W - W'$$

$$\Delta W = Q (1 - T_0 / T_1) - Q (1 - T_0 / T_2) = T_0 (Q / T_2 - Q / T_1)$$

Per la definizione di entropia ($dS = dQ / T$), il termine tra parentesi rappresenta la **variazione di entropia** totale dovuta alla trasmissione irreversibile di calore (da T_1 a T_2) e quindi l'energia non utilizzabile per compiere lavoro è data da:

$$\Delta W = T_0 \Delta S_t$$

L'energia non più utilizzabile per compiere lavoro in seguito ad una trasformazione irreversibile è T_0 volte la variazione totale di entropia del sistema e dell'ambiente circostante.

Quanto maggiore è l'irreversibilità di una trasformazione, tanto maggiore è l'aumento di entropia totale e tanto maggiore l'energia non più utilizzabile per compiere lavoro.

I cicli termodinamici

Il caso limite è costituito da **un sistema che produce calore bruciando un combustibile con temperatura di fiamma di qualche centinaia di gradi (1500 K) per trasferirlo ad un serbatoio a temperatura ambiente (293 K)**, come avviene in un impianto di riscaldamento alimentato da una caldaia a gas.

È evidente che l'operazione termodinamicamente corretta sarebbe quella di inserire tra i due serbatoi a temperatura diversa (gas di combustione-aria dell'ambiente interno) un ciclo termodinamico che consentirebbe di utilizzare meglio la qualità dell'energia resa disponibile ad alta temperatura con produzione di energia elettrica e calore ceduto all'ambiente da riscaldare.

Un processo spontaneo, irreversibile (come il passaggio di calore da un corpo più caldo ad uno più freddo, nell'esempio di prima dai gas di combustione all'aria dell'ambiente interno), **determina la perdita di capacità del sistema di compiere lavoro**; il complesso sistema/ambiente è caratterizzato da un aumento di entropia, la cui entità quantifica l'irreversibilità del processo. Se sussiste una differenza di potenziale, è però sempre possibile realizzare un cambiamento di stato che consenta di convertire in lavoro l'energia contenuta in varie forme nel sistema, inserendo un ciclo termodinamico tra le due sorgenti di calore. Viceversa quando il sistema evolve spontaneamente fino a raggiungere l'equilibrio con l'ambiente, questa situazione è detta, da alcuni autori, stato morto proprio perché con una differenza di potenziale nulla ($T = 0$) è nulla anche la possibilità di compiere lavoro.

I cicli termodinamici

Oltre all'entropia, per analizzare i processi di conversione dell'energia, può essere utilizzata la funzione **exergia**, che è stata definita da Rant nel 1956 come la **massima quantità di energia meccanica ottenibile da un sistema che passa dal suo stato iniziale a quello finale, in equilibrio con l'ambiente, interagendo esclusivamente con l'ambiente stesso.**

Se è disponibile una certa quantità di energia, si dice exergia la frazione trasformabile in qualsiasi altra forma di energia e si dice anergia la frazione rimanente non trasformabile. L'energia meccanica, l'energia elettrica e l'energia potenziale costituiscono exergia pura e quindi sono forme di energia pregiata. Una quantità di calore scambiata o l'energia interna di un qualsiasi sistema termodinamico sono invece solo parzialmente trasformabili in altre forme di energia e la loro frazione trasformabile dipende dalla temperatura.

In ogni processo la somma dell'exergia e dell'anergia rimane costante; l'anergia non può mai essere trasformata in exergia.

I cicli termodinamici

Data una quantità di calore Q disponibile a temperatura T_1 , il valore dell'**exergia** è:

$$EX = Q (1 - T_0/T_1)$$

dove T_0 è la temperatura dell'ambiente esterno di riferimento.

exergia è l'energia trasformabile in qualsiasi altra forma

anergia è la frazione non trasformabile

$$A = Q (T_0/T_1)$$

L'energia disponibile di un sistema è la massima quantità di energia che può essere trasformata in lavoro, quando il sistema è portato in equilibrio con l'ambiente, l'exergia del sistema è la sua energia disponibile rispetto all'ambiente, considerato come serbatoio ideale.

L'exergia come l'energia è una proprietà estensiva, che si conserva solo nei processi reversibili.

Quando un sistema subisce un processo spontaneo, e quindi irreversibile, la sua energia si degrada, cioè la sua exergia si consuma.

I cicli termodinamici

In ogni processo termodinamico in cui siano in gioco trasformazioni di energia o scambi termici tra corpi a temperatura diversa il rendimento exergetico si può esprimere così:

$$\eta_{\text{ex}} = \text{exergia ottenuta} / \text{exergia spesa}$$

Un'altra funzione introdotta H.W. Odum negli anni ottanta per ottimizzare l'uso delle risorse è **l'emergia** che quantifica **la quantità di energia solare necessaria per ottenere un determinato prodotto.**

Questa grandezza diventa un metodo di misurazione della **sostenibilità** di cicli di produzione diversi.

La cogenerazione

Un sistema di cogenerazione, definito anche ad energia totale (SET), realizza l'obiettivo di soddisfare le esigenze energetiche di una determinata utenza civile o industriale con la generazione di energia elettrica e di calore rendendo massima l'utilizzazione delle fonti primarie di energia.

La traduzione in termini impiantistici e tecnologici di un tale concetto implica la definizione di un'adeguata metodologia progettuale e l'impiego di appropriate tecniche di analisi, energetiche ed economiche.

Per quanto riguarda la configurazione generale, il SET è un sistema il cui contorno è attraversato da flussi di energia e può essere chiuso o aperto.

Sono chiusi tutti quei sistemi che, isolati da altri sistemi energetici, forniscono una quantità di energia pari a quella richiesta dall'utenza; sono aperti quelli che collegati ad altri sistemi possono produrre una quantità di energia diversa rispetto a quella richiesta dall'utenza.

L'elemento tecnologico che caratterizza il SET è il **motore primo**, vale a dire il componente che, oltre alla generazione di energia **elettrica**, è anche in grado, col recupero di una frazione più o meno cospicua del calore di scarto, di alimentare un'utenza **termica**.

La cogenerazione

In generale sono possibili varie configurazioni di impianto, la più semplice delle quali comprende:

- **motore termico e generatore elettrico;**
- **sistema di recupero del calore di scarto dal motore;**
- **sistema di integrazione della produzione di energia termica.**

Il soddisfacimento di un'utenza più articolata rende necessario l'inserimento di altri componenti quali: pompa di calore, sistema di refrigerazione a compressione e/ o ad assorbimento, sistema di accumulo dell' energia.

Il motore primo può essere:

- **un motore alternativo a combustione interna,**
- **una turbina a gas**
- **una turbina a vapore.**

Motore a combustione interna

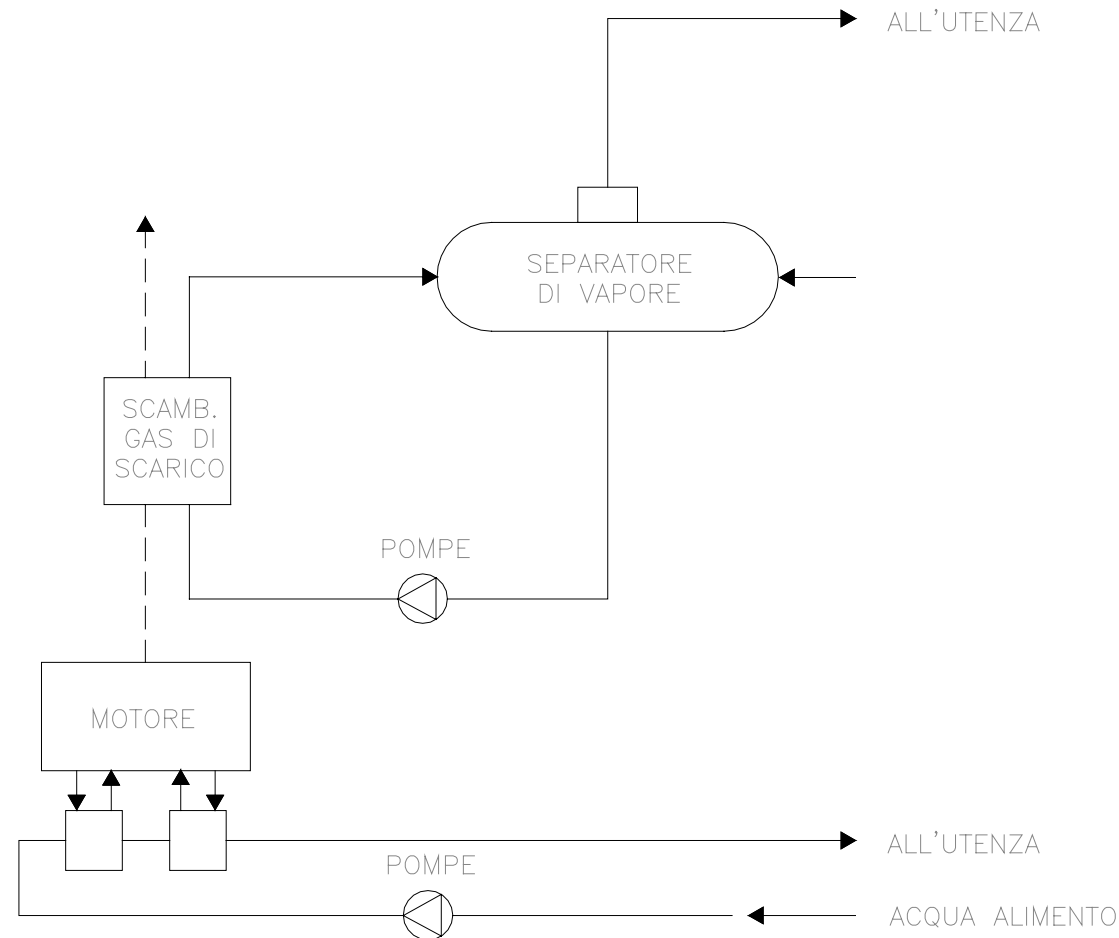
In un campo di potenza fino a 40 MW, il motore Diesel, ed in minor misura il motore a gas, rappresenta il motore con le prestazioni più elevate disponibili sul mercato.

Il rendimento elettrico delle unità di maggiore potenza coincide con quello delle centrali elettriche (40-42%) ed il rendimento globale, incluso il recupero di calore, raggiunge valori intorno all'80-85%.

La curva del rendimento in funzione del carico si mantiene quasi piatta sino a valori pari al 50-60% del carico nominale e l'utilizzazione del calore di scarto, anche ad elevata temperatura, non riduce il rendimento elettrico del motore. Gli schemi di un impianto che utilizzano motori diesel sono numerosi, con soluzioni tecniche di volta in volta dettate dalle esigenze delle utenze. La soluzione più semplice prevede il recupero del calore dei gas di scarico che è usato per la produzione di vapore mentre quello recuperato dall'acqua di raffreddamento e dall'olio di lubrificazione è utilizzato per la produzione di acqua calda. Il vapore può essere inviato in turbina per la produzione di altra energia elettrica. Il rendimento globale di un impianto con produzione combinata di energia elettrica e calore del tipo illustrato è dell'ordine del 75%.

Negli impianti di cogenerazione asserviti ad una rete di teleriscaldamento che adottano motori primi funzionanti a ciclo diesel il recupero del calore di scarto avviene tramite la produzione d'acqua calda ad una temperatura di 80-90°C (acqua calda) fino a 180-200°C (acqua surriscaldata).

Motore a combustione interna



Schema di un impianto per il recupero del calore in un motore Diesel

Turbina a gas

La turbina a gas è una macchina rotante a flusso continuo con un fluido comprimibile che può operare in un ciclo aperto o chiuso. Il rendimento di una turbina a gas a ciclo aperto arriva a valori medi del 30% per ciclo semplice e del 35% per il ciclo rigenerativo.

Le turbine a gas sono disponibili in una vastissima gamma di potenza, anche relativamente piccole. Solitamente il fluido di lavoro viene compresso e riscaldato, quindi fatto espandere adiabaticamente nella turbina con produzione di lavoro. Il riscaldamento del fluido avviene con la combustione di una miscela di aria compressa(comburente) e gas (combustibile) e quindi il fluido evolvente modifica la sua composizione.

A valle della camera di combustione viene immessa un'ulteriore quantità di aria, per abbassare la temperatura dei gas combusti a temperature sopportabili dagli ugelli e dalla palettatura della turbina. I prodotti di combustione in uscita dalla turbina vengono espulsi nell'ambiente o inviati alla sezione di recupero del calore; il lavoro fornito dal ciclo(energia elettrica prodotta) è dato dalla differenza tra il calore entrante ed il calore uscente. Le turbine a gas storicamente sono nate per bruciare gas naturale e le prestazioni standard degli impianti sono riferite generalmente a questo combustibile; è però possibile alimentare la turbina a gas con una gamma abbastanza vasta di combustibili, sia gassosi che liquidi, eventualmente pretrattati. **La temperatura d'uscita dei gas di scarico varia tra i 400°-500°C, è quindi evidente l'opportunità di effettuare il recupero del loro contenuto energetico.**

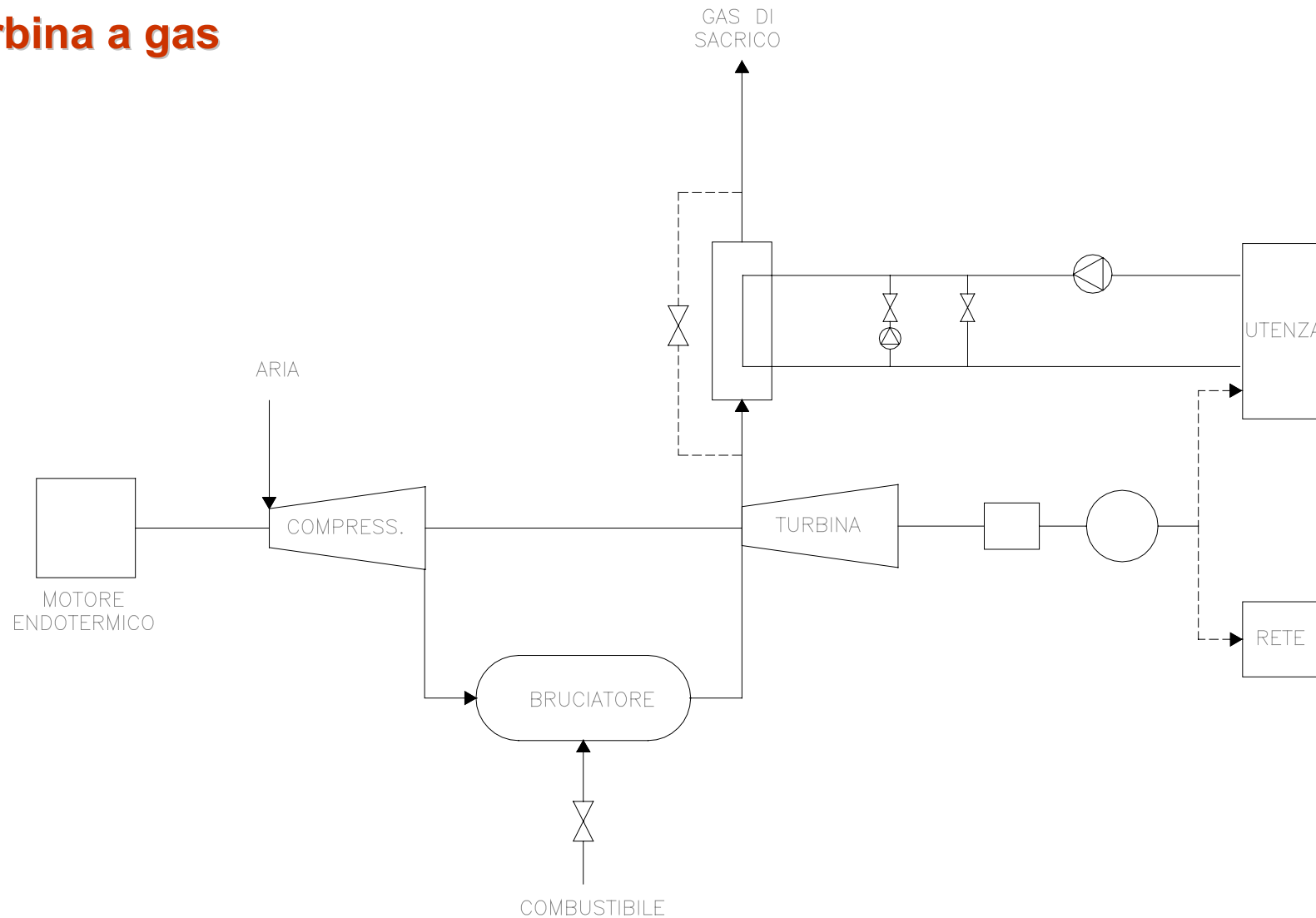
Turbina a gas

Vi sono dei limiti inferiori per la temperatura dei gas nella fase di recupero del calore, in quanto si devono evitare fenomeni di condensazione acida negli scambiatori; inoltre occorre mantenere una temperatura al camino compatibile con le esigenze di dispersione degli inquinanti. Le possibilità di cogenerazione offerte dalla turbina a gas sono notevoli:

- **recuperi di calore per usi diretti di processo;**
- **produzione di fluidi termovettori;**
- **ciclo combinato turbina a gas/turbina a vapore.**

Il calore sensibile dei gas di combustione scaricati dalla turbina può dunque venire utilizzato per produrre acqua surriscaldata e vapore da destinare ad usi di processo, il vapore prodotto può anche essere utilizzato per azionare una turbina a vapore, aumentando così la quantità di energia elettrica prodotta dall'impianto (ciclo combinato).

Turbina a gas



Schema di un impianto di recupero con turbina a gas per la produzione di acqua calda

Turbina a vapore

L'impiego di vapor d'acqua quale fluido motore in macchine per la produzione di energia meccanica ha rappresentato il primo tentativo di trasformazione di calore in lavoro. La turbina a vapore è una macchina costituita da una serie di condotti fissi, ricavati tra palette solidali con la cassa e di condotti mobili formati con una palettatura ruotante con l'albero: il fluido, accelerato dall'espansione, investe la palettatura rotante esercitando una forza ed imprimendo un movimento rispetto all'asse di rotazione; viene così generato lavoro meccanico raccolto dall'albero motore e poi trasformato in energia elettrica. Le turbine possono venire suddivise a seconda dell'impiego:

- **a condensazione**
- **a contropressione**
- **a prelievo regolato**

La turbina a condensazione è utilizzata per la produzione di sola energia elettrica; i migliori rendimenti si ottengono per gruppi di grande potenza unitaria, superiore a 100MW.

Turbina a vapore

Nella turbina a contropressione il vapore viene scaricato alla pressione e quindi alla temperatura stabilite per i successivi usi termici; nell'espansione in turbina il vapore genera energia elettrica.

Tra i vantaggi di questa macchina si possono elencare l'elevato rapporto termico/elettrico e i bassi consumi specifici; tra gli svantaggi la rigidità dell'impianto in quanto la produzione di energia elettrica è funzione diretta del fabbisogno termico e può non coincidere con la domanda dell'utenza.

La turbina a prelievo regolato è costituita da uno stadio ad alta pressione, dove si espande tutto il vapore prodotto, e da uno stadio a bassa pressione, dove si espande il vapore in eccesso rispetto a quello richiesto dall'utenza; questa configurazione rende possibile la variazione sia del carico elettrico che del carico termico, secondo le richieste dell'utenza.

Il ciclo a vapore è costituito essenzialmente dalla caldaia, che produce vapore ad alta pressione ed elevata temperatura e dalla turbina, nella quale il vapore si espande e genera energia meccanica. Il vapore scaricato dalla turbina deve venire condensato e quindi ceder calore, appunto quello di condensazione, ad un fluido a temperatura più bassa, per chiudere il ciclo. Il componente dove avviene il passaggio del fluido da vapore a liquido è il condensatore. L'acqua solitamente usata come fluido di raffreddamento nel condensatore viene prelevata da un corso d'acqua o dal mare a cui viene restituita con un incremento di temperatura di 5° - 15°C . Nel caso in cui non sia disponibile acqua, per la condensazione del vapore si usa come fluido refrigerante l'aria.

Turbina a vapore

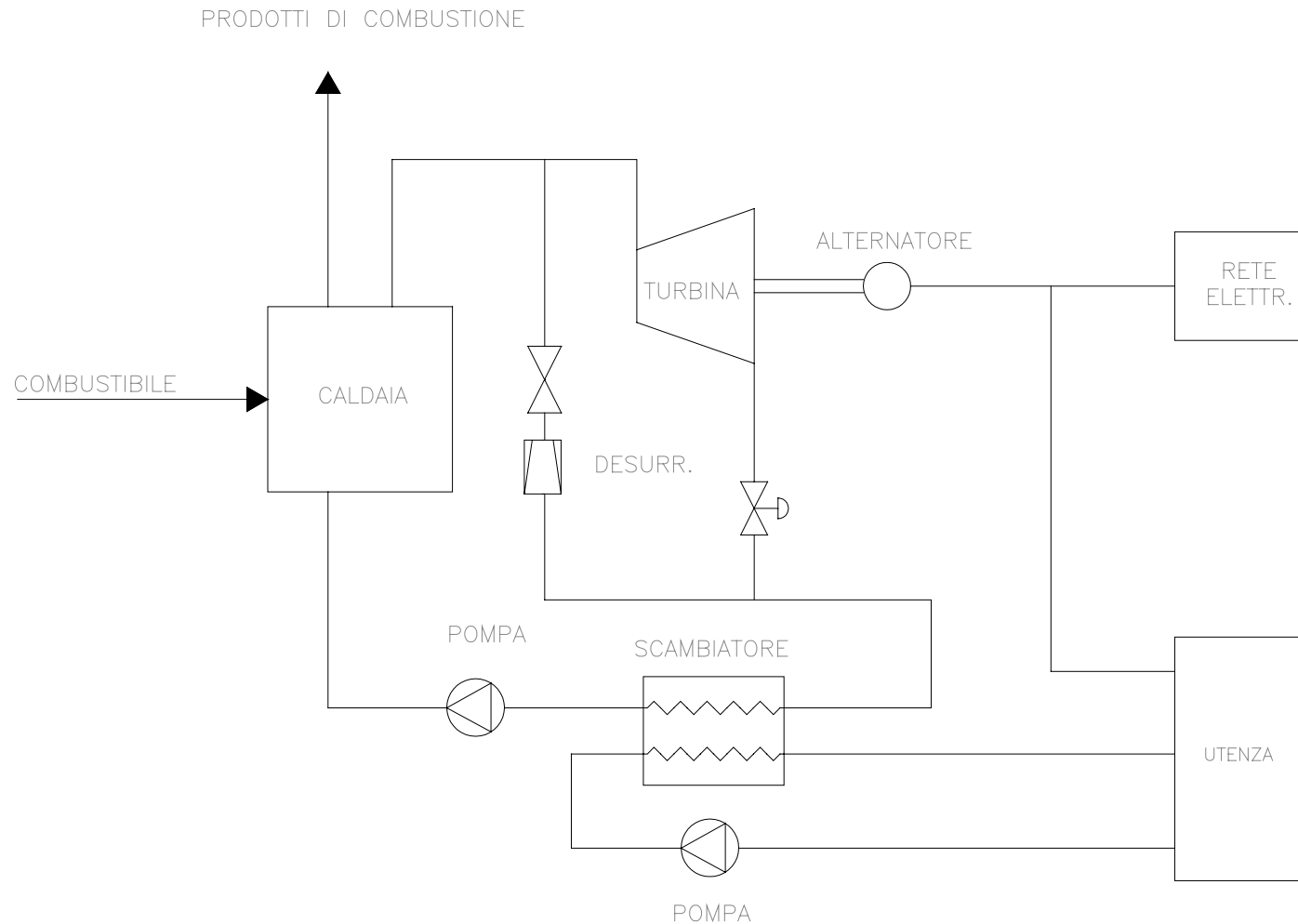
Lo schema concettuale di un impianto di cogenerazione che utilizza una turbina a vapore è del tutto analogo a quello delle centrali di grande potenza per la produzione di sola energia elettrica.

La differenza fondamentale consiste nel fatto che il calore sottratto al vapore condensante viene recuperato da un'utenza termica invece che essere disperso nell'ambiente.

In questo caso il rendimento complessivo (energia elettrica + calore utilizzato) / energia fornita può raggiungere il 90%., a scapito però di un minor rendimento elettrico in quanto il vapore scaricato dalla turbina ha un contenuto entalpico tale da poter essere usato dall'utenza termica.

I sistemi a energia totale possono essere anche di modesta potenzialità (**microcogenerazione**) e consentono una generazione di energia termica ed elettrica distribuita sul territorio, utilizzando risorse energetiche disponibili localmente per servire utenze a scala di edificio o di quartiere.

Turbina a vapore



Sistema ad energia totale con motore primo tipo turbina a vapore a compressione per rete di teleriscaldamento

La pompa di calore

Le pompe di calore, da un punto di vista termodinamico, funzionano secondo un ciclo inverso, identico a quello del frigorifero. L'effetto utile, non è il calore sottratto a bassa temperatura al sistema che si vuole raffreddare come nel frigorifero, ma quello ceduto, a più alta temperatura, al sistema che si vuole riscaldare (somma del calore scambiato a bassa temperatura e del lavoro fornito alla macchina).

La stessa macchina può funzionare sia come frigorifero che come pompa di calore.

I cicli più usati sono quello a compressione e quello ad assorbimento, le pompe di calore a ciclo Joule, in cui il refrigerante è un gas (generalmente aria), hanno avuto qualche applicazione pratica ma sono state presto abbandonate per le basse efficienze e per i costi elevati; esistono anche le pompe di calore termoelettriche – non a ciclo termodinamico – che sfruttano l'effetto Peltier, che sono usate in applicazioni particolari.

Le sorgenti a bassa temperatura che alimentano le pompe di calore possono essere l'aria, l'acqua di falda o di superficie, il terreno ed anche i liquami urbani depurati in uscita dagli impianti di trattamento.

La pompa di calore

L'efficienza di una pompa di calore si esprime come:

$$\text{COP}_{\text{(coefficient of performance)}} = Q/W$$

rapporto tra il calore scambiato con la sorgente ad alta temperatura(ad esempio l'aria dell'ambiente che si vuole riscaldare) e l'energia spesa, che nelle macchine a compressione è quella elettrica, utilizzata per azionare il compressore.

L'efficienza di una pompa di calore a compressione è mediamente superiore a 3, in pratica vuol dire ottenere più di tre unità termiche per ogni unità meccanica consumata.

L'efficienza massima delle pompe di calore è quella del ciclo di Carnot inverso:

$$\text{COP} = T_1 / (T_1 - T_2)$$

dove

T_1 e T_2 sono le temperature delle due sorgenti, calda e fredda rispettivamente, in gradi Kelvin; l'efficienza è tanto maggiore quanto minore è la differenza di temperatura delle due sorgenti tra cui lavora il fluido frigorifero. Da ciò deriva la convenienza di utilizzare la pompa di calore quando dall'utenza viene richiesta energia termica a temperatura medio/bassa.

La pompa di calore

Le pompe di calore vengono usate nel settore civile, anche nelle reti di riscaldamento a distanza, e nel settore industriale.

Oltre agli edifici residenziali e del terziario dotati di impianti di riscaldamento funzionanti a bassa temperatura, le utenze più adatte alle pompe di calore di medie e grandi dimensioni sono gli ospedali, centri commerciali, grandi complessi del terziario in cui è richiesta la fornitura di “caldo” e di “freddo”.

Gli impianti di riscaldamento a pannelli radianti che funzionano con acqua a circa 30 – 35°C rappresentano un’utenza particolarmente adatta perché il rendimento delle pompe di calore è elevato, così come lo sono quelli che usano come elementi terminali di scambio i ventilconvettori (fan-coils), eventualmente integrati con aria primaria, in quanto funzionano con acqua a circa 50°C in inverno e 10°C in estate, temperature classiche per le pompe di calore reversibili.

Anche le unità di trattamento aria degli impianti di condizionamento possono essere alimentate con l’acqua calda prodotta dalla pompa di calore.

La pompa di calore

Le sorgenti a bassa temperatura più utilizzate per gli impianti con pompa di calore sono:

Aria esterna

impiegabile quando la sua temperatura non scende sotto i 6°C, con temperatura dell'aria intorno a 0°C si forma condensa e, poi, brina sulle batterie di scambio termico. La formazione di ghiaccio può essere evitata con opportuni accorgimenti, ma temperature troppo basse della sorgente fredda riducono l'efficienza termodinamica; le pompe di calore ad aria sono pertanto particolarmente adatte in climi temperati.

Acqua di falda

è un'ottima fonte di calore per il valore della temperatura e la sua costanza nell'arco dell'anno. Fino a qualche anno fa il suo sfruttamento era generalmente proibito, attualmente alcune regioni ne incentivano l'uso per alimentare pompe di calore anche con finanziamenti a fondo perduto.

Rimane il problema della restituzione dell'acqua usata nel ciclo frigorifero, che è conveniente se fatta in corsi d'acqua superficiali, onerosa se immessa in fognatura; in alcuni casi è stata accettata la reimmissione in falda dell'acqua utilizzata.

Acqua superficiale

le acque superficiali sono la sorgente più facile di calore a bassa temperatura (8-15°C). Esse possono essere utilizzate nel periodo estivo per scambiare calore al condensatore delle macchine in esercizio frigorifero.

La pompa di calore

Terreno

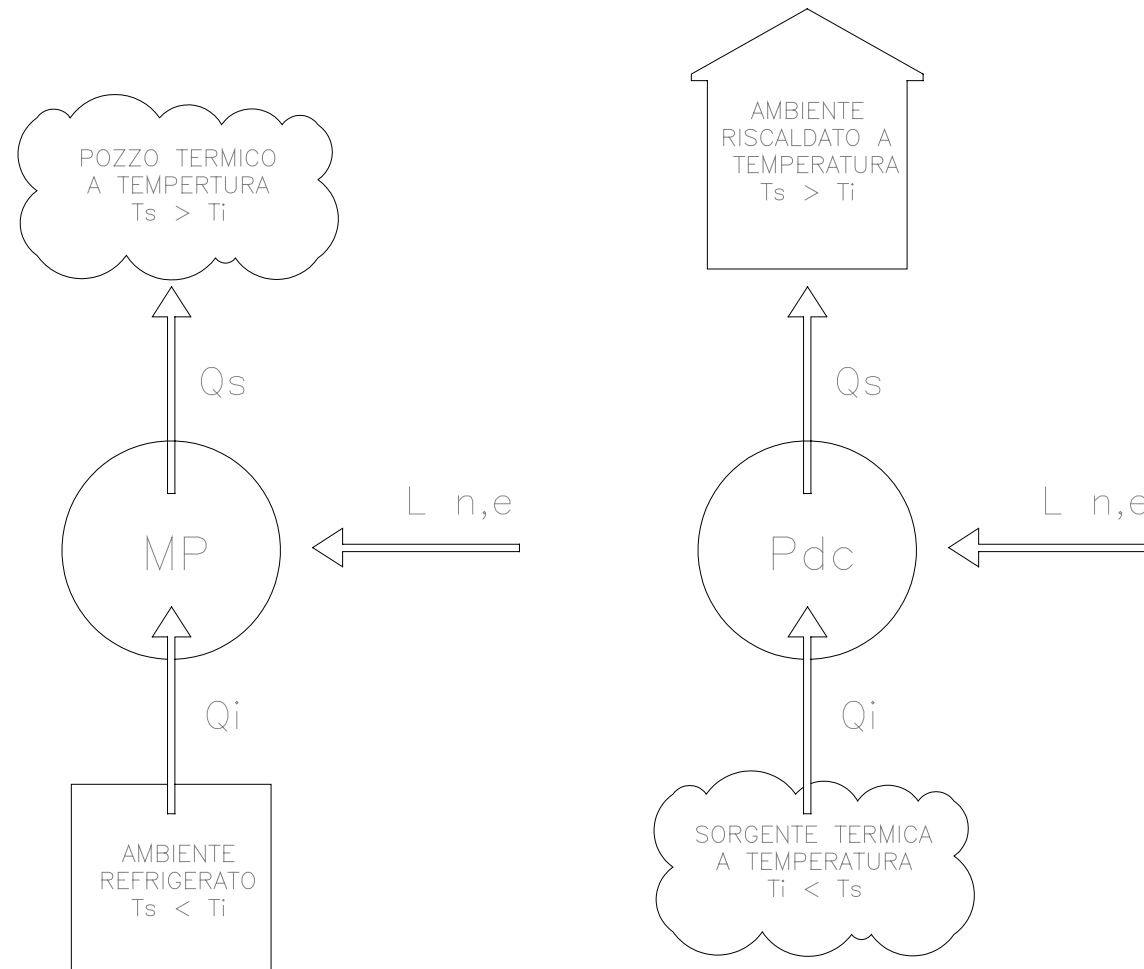
E' possibile scambiare calore col terreno, la cui temperatura è quasi costante sull'intero arco dell'anno, usando batterie di tubi orizzontali interrati a 1, 5- 2 m di profondità oppure con sistemi di tubi verticali che possono arrivare ad una profondità anche superiore a 100 m. I tubi possono essere percorsi dall'acqua come fluido vettore o in alcuni casi dallo stesso refrigerante (espansione diretta). Gli impianti di questo tipo sono in genere di limitata potenza.

Le superfici di terreno necessarie possono essere valutate sul valore medio della potenza estraibile, circa 10- 20 W/m di tubazione, in genere in rame o in polietilene ad alta densità; con tubi verticali profondi lo scambio di calore è dell'ordine di 50 W/m. Le stesse tubazioni possono essere utilizzate per cedere calore al terreno, nel periodo estivo, per la fase di condensazione del ciclo frigorifero.

Altre fonti di calore

Possono essere utilizzate anche acque di scarico derivanti da cicli industriali o da impianti di depurazione, come avviene in molti paesi del Nord Europa. Le acque di fogna hanno una temperatura di circa 12°C in inverno e 20°C in estate.

La pompa di calore



Funzionamento macchina frigorifera e pompa di calore

Biomassa

La biomassa è la materia vegetale prodotta dall'energia solare con la sintesi clorofilliana e comprende le sostanze di origine biologica in forma non fossile.

Le biomasse possono considerarsi la forma più sofisticata impiegata dalla natura per l'accumulo dell'energia solare.

Le biomasse disponibili per la produzione di energia sono di varia provenienza principalmente residui di origine agricola e forestale, scarti dell'industria agro-alimentare e dell'allevamento o prodotti specifici derivanti da coltivazioni energetiche.

Il settore è quindi caratterizzato da una disponibilità di risorse, sia primarie che secondarie, ampia e diversificata e da numerose tecnologie di conversione.

Negli ultimi anni sono stati compiuti molti sforzi per incrementare l'applicazione di tecnologie energetiche per lo sfruttamento di biomassa di provenienza diversa.

Le biomasse si possono considerare risorse rinnovabili se vengono utilizzate in tempi non inferiori a quelli della loro riproduzione; solitamente sono diffuse sul territorio(bassa concentrazione) e non sono disponibili con continuità nell'arco dell'anno.

Biomassa

La biomassa in relazione alla sua composizione chimica e al suo stato fisico può essere utilizzata direttamente come combustibile oppure convertita in altro combustibile (metano, etanolo, metanolo, prodotti carboniosi) con l'impiego di microrganismi oppure per l'azione di elevate temperature o di agenti chimici; sinteticamente si può procedere lungo due direzioni:

- **Processo termochimico**
- **Processo biochimico.**

Le soluzioni più praticate per l'utilizzazione energetica delle biomasse sono:

- **combustione ed uso del calore per riscaldamento e/o per produrre energia elettrica**
- **fermentazione di tipo anaerobico con produzione di gas combustibile, utilizzabile per alimentare motori a combustione interna**
- **pirolisi/gassificazione con formazione di prodotti combustibili di vario tipo a secondo delle condizioni operative del processo di trasformazione.**
- **estrazione di olio e produzione di combustibile da piante oleaginose.**

Biomassa

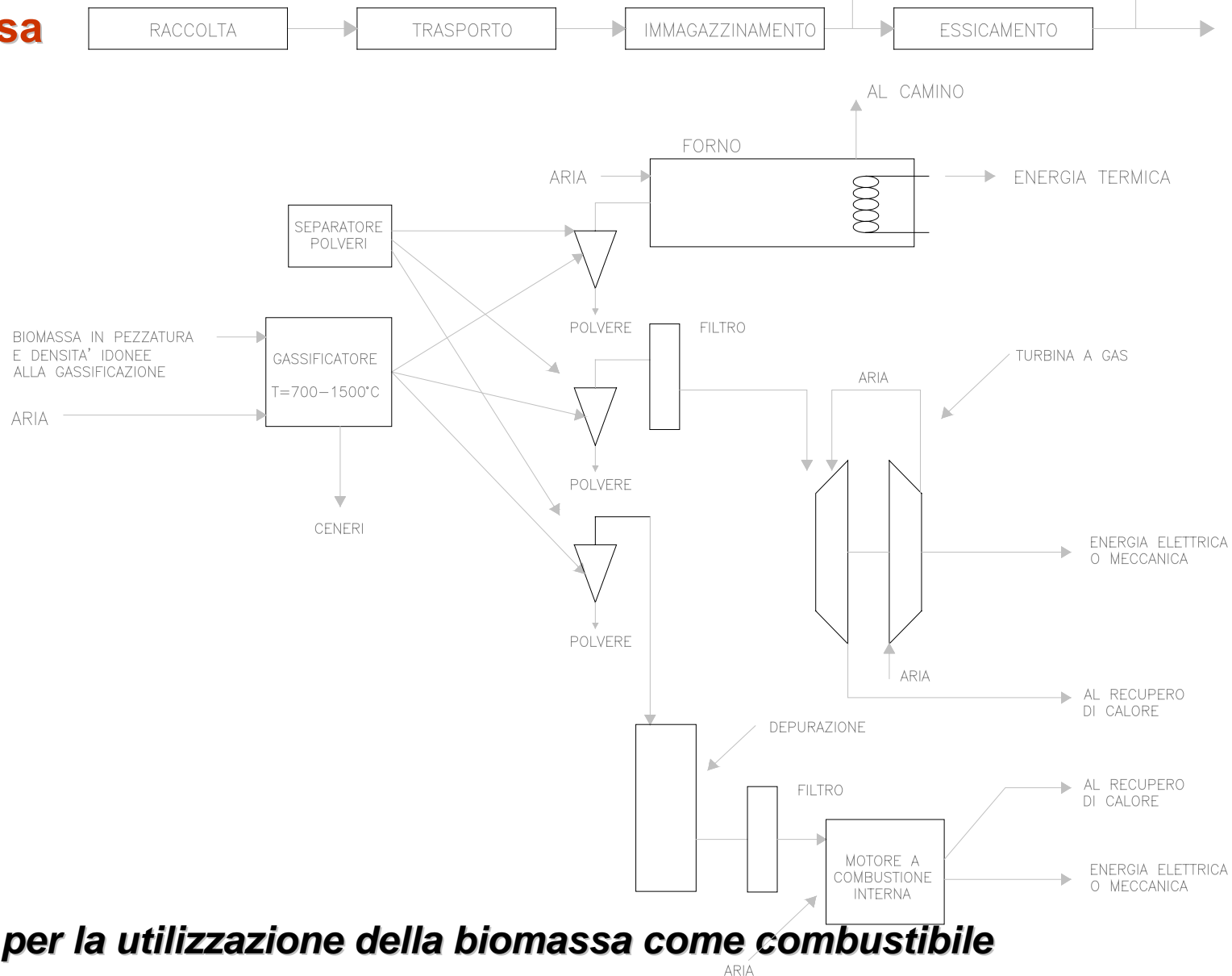
Nei processi che usano la biomassa come combustibile è quasi sempre necessario un pretrattamento del materiale, per renderlo omogeneo e per ridurre la pezzatura, prima di inviarlo in camera di combustione.

Il combustore ed il sistema di recupero del calore hanno specifiche caratteristiche costruttive in relazione alla tipologia della biomassa utilizzata.

La digestione anaerobica è un processo di conversione di tipo biochimico, che consiste nella demolizione ad opera di micro-organismi specializzati, in ambiente privo di ossigeno, di sostanze organiche complesse.

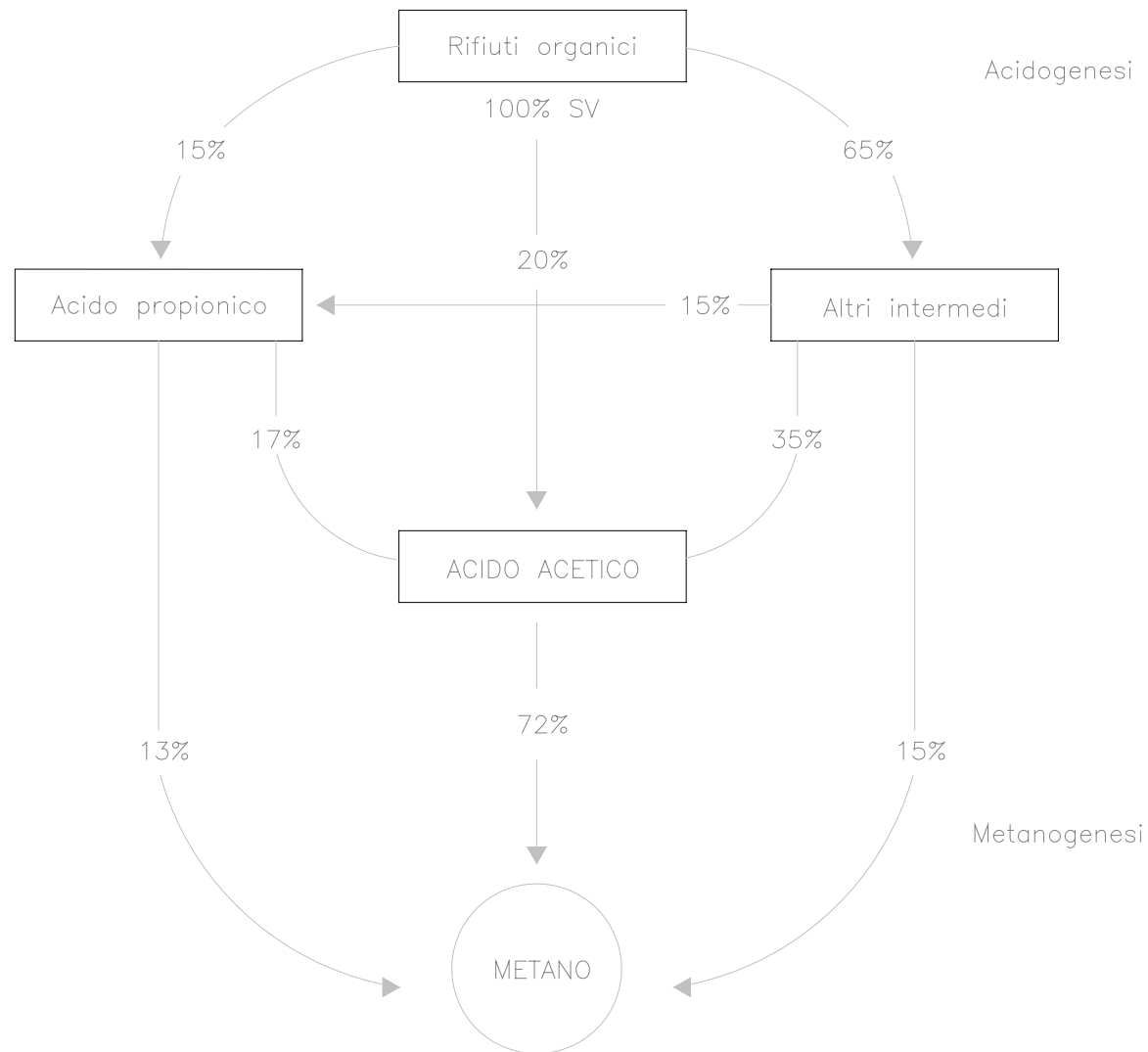
Il risultato del processo è la produzione di un miscuglio gassoso (biogas) contenente fino al 65% di CH_4 e circa 35% di CO_2 , oltre ad alcune impurezze come H_2S .

Biomassa



Schema per la utilizzazione della biomassa come combustibile

Biomassa



Schema processo di metanogenesi

Biomassa

Il potere calorifico del gas biologico varia tra 10 – 24 MJ/Nm³.

Il processo deve avvenire in assenza di ossigeno in reattori dotati di sistemi di agitazione e termostatazione (circa 35°C); la carica al di gestore deve essere realizzata con materiali contenenti tra le 0,5 ed il 10% di solidi totali.

Per tale ragione occorre che la frazione organica separata dei rifiuti urbani o la biomassa derivante da attività agricole, prima di essere immessa nel di gestore, venga miscelata con fanghi di depurazione o liquami urbani o zootecnici, per aumentare opportunamente il tenore di umidità.

Il biogas può essere utilizzato tal quale, previa deumidificazione, o purificato con membrane o zeoliti naturali, fino a metano quasi puro.

Il gas biologico viene solitamente utilizzato in loco per produrre energia elettrica e termica con motore a combustione interna.

Biomassa

La fermentazione alcolica è un processo di trasformazione in etanolo dei glucidi contenuti nei prodotti vegetali.

Il sistema di gassificazione presenta alcuni aspetti peculiari:

- **efficienza di conversione energetica alta**
- **tecnologia relativamente semplice e adatta ad unità decentrate anche di piccole dimensioni**
- **rispetto alla combustione diretta ha maggior facilità di controllo e produce minor carico inquinante**

Per utilizzare a fini energetici le biomasse è necessario definirne, per il territorio in esame, la quantità disponibile in un arco temporale adeguato, ad esempio come massa di sostanza secca all'anno, e la densità di distribuzione. La scarsità di dati affidabili rende quasi sempre necessaria una prima valutazione con indicatori ricavati dalla letteratura, verificata poi con indagini sperimentali mirate.

L'utilizzazione energetica della biomassa contenuta nei rifiuti solidi urbani è trattata a parte per l'importanza che essa riveste nella pianificazione del territorio.

Rifiuti solidi urbani

L'eliminazione dei rifiuti prodotti dalle diverse attività umane costituisce uno dei problemi centrali della nostra società, per i numerosi aspetti che essa comporta: tecnico, organizzativo e sociale e ognuno di questi aspetti ha ovviamente un pesante riscontro economico.

Oggi, un risultato da perseguire da parte degli Enti Territoriali attraverso la pianificazione è quello di rendere minimi i flussi relativi ai residui e agli sfridi derivanti dalle strutture di produzione e di consumo delle merci che finiscono nell'ambiente e di rendere massimo il flusso di ritorno dal sottosistema "consumo" al sottosistema "produzione".

Una volta adottati tutti gli accorgimenti economicamente compatibili per la riduzione dei rifiuti prodotti, il problema del loro smaltimento può essere affrontato sulla base di una seconda considerazione generale che, pur mantenendo come prioritario il vincolo igienico-sanitario, porta ad individuare nei **rifiuti urbani un potenziale energetico non trascurabile.**

Rifiuti solidi urbani

Se facciamo riferimento al potere calorifico medio dei soli rifiuti solidi urbani, cioè alla quantità di energia termica che si rende disponibile con la combustione di una massa unitaria di rifiuto, e supponendo di utilizzare come combustibile la metà dei rifiuti urbani raccolti, si potrebbe ottenere una produzione di energia elettrica pari al 3-3.5% del fabbisogno totale italiano. Indicativamente si possono ottenere circa 10 TWh/anno usando parte del rifiuto urbano come combustibile; se poi si recupera anche il calore di scarico (impianto di cogenerazione) il rendimento complessivo può superare l'80%.

Una quota percentuale, dunque, non elevata ma apprezzabile in relazione alle cifre assolute a cui si riferisce e che può essere considerata come invariante col tempo, in conseguenza della ragionevole ipotesi che il contenuto energetico e la produzione pro-capite dei rifiuti, in un dato contesto, siano proporzionali al consumo energetico.

La legge 10/90 sul risparmio energetico ed il decreto Ronchi classificano il rifiuto solido tra le fonti rinnovabili di energia ed i sistemi di generazione combinata di energia elettrica e calore una soluzione da incentivare per il corretto uso delle fonti di energia.

Rifiuti solidi urbani

È evidente dunque l'opportunità di esaminare tutti quei processi di smaltimento che consentano recuperi in termini di energia e materie; tuttavia deve anche essere chiaro che le operazioni di recupero non sono gratuite e che quindi è necessaria una valutazione tecnico-economica volta a stabilire fino a che punto sia opportuno effettuare quei tentativi che impongono, ai fini del recupero, una eccessiva sofisticazione dei sistemi di raccolta e delle tecniche di smaltimento.

Una corretta gestione dei residui e degli scarti derivanti dalle diverse attività umane può dare un contributo, specialmente in alcune aree, per una politica di razionalizzazione delle risorse attraverso una serie di obiettivi che possono essere così schematizzati:

- **Raccolta differenziata con recupero e riutilizzo di componenti;**
- **Utilizzazione energetica della componente ad elevato potere calorifico;**
- **Produzione di biomasse utilizzabili a fini fertilizzanti dalla frazione organica più pregiata (compost verde).**

Rifiuti solidi urbani

L'individuazione delle linee di intervento tra le diverse possibilità tecnologiche deve essere supportata da informazioni attendibili in merito a:

- **Localizzazione dei centri di produzione dei rifiuti;**
- **Caratteristiche qualitative e quantitative dei rifiuti prodotti;**
- **Analisi delle infrastrutture nell'area interessata (reti di trasporti, servizi energetici, etc.);**
- **Verifica del mercato dei prodotti di recupero.**

E' ovvio che nella scelta della tecnologia più appropriata devono essere considerati gli effetti ambientali che le diverse opzioni comportano; problemi complessi sono infatti legati sia ai procedimenti di combustione, per il possibile inquinamento che gli effluenti gassosi possono provocare, che a quelli di riciclaggio e trasformazione, in relazione soprattutto alla difficoltà di commercializzazione dei prodotti recuperati ed al pericolo connesso all'uso non controllato di alcuni di essi.

Rifiuti solidi urbani

La legislazione italiana, in accordo con le direttive della Comunità Economica Europea, si è data una disciplina organica che regola le diverse fasi del **ciclo dei rifiuti, dalla produzione, alla raccolta, allo smaltimento ed individua gli obiettivi prioritari degli interventi, che devono promuovere tra l'altro i sistemi tendenti a riciclare e riutilizzare i rifiuti e a recuperare da essi materiali ed energia, favorendo, comunque, i processi atti a limitarne la formazione.**

Lo smaltimento dei rifiuti è definito nelle sue varie fasi “**attività di pubblico interesse**” che deve essere effettuato in modo da garantire il rispetto delle esigenze igienico - sanitarie e la salvaguardia dell'ambiente, ma viene ribadito il criterio di economicità e di efficienza che deve guidare le scelte dei diversi enti competenti, regioni, province e comuni.

Rifiuti solidi urbani

Il quadro legislativo attuale sembra modificare nella sostanza la definizione di rifiuto, introducendo il concetto di **residuo, riutilizzabile eventualmente previo idoneo trattamento**; si dice tra l'altro che **“devono essere promossi, con l'osservanza di criteri di economicità ed efficienza, sistemi tendenti a riciclare, riutilizzare i rifiuti o recuperare da essi materiali ed energia”**.

Vi sono poi altre normative riguardanti il risparmio energetico che forniscono indicazioni interessanti al pianificatore anche nel settore dello smaltimento dei rifiuti laddove incentivano la cogenerazione, il teleriscaldamento, l'uso di energie rinnovabili, l'integrazione di combustibili non tradizionali.

Un quadro legislativo che apre la strada ad una progettazione integrata del territorio in cui anche i rifiuti hanno il loro ruolo, come fonte rinnovabile di energia. Il rifiuto urbano, o una sua parte, può essere utilizzato direttamente come combustibile oppure essere sottoposto a processi di trasformazione che consentono di ottenere prodotti prevalentemente gassosi di varia composizione, caratterizzati da un buon potere calorifico. I processi utilizzati sono quelli di ossidazione, pirolisi/gassificazione, digestione anaerobica.

Rifiuti solidi urbani

COMBUSTIONE DIRETTA 1/3

La combustione (ossidazione in eccesso d'aria) avviene in un forno a griglia piana o in forno rotante e, anche, in letto fluido; la combustione è di tipo eterogeneo (combustibile solido, comburente gassoso) e avviene solitamente con notevoli eccessi d'aria (fino al 200%). Il rifiuto, tal quale o pre - trattato (CDR, combustibile derivato dai rifiuti), viene immesso nella camera di combustione; i gas uscenti ad alta temperatura ($950\div 1000$ °C) sono inviati ad uno scambiatore di calore (caldaia) che produce vapore.

Il vapore viene utilizzato in un ciclo termico con produzione combinata di energia elettrica, che viene immessa nella rete di distribuzione, e di calore, che alimenta una rete di riscaldamento a distanza. I gas ad una temperatura di circa 250°C vengono inviati alla sezione di depurazione, che è notevolmente complessa in conseguenza degli standard di emissione richiesti dalle normative antinquinamento.

Il recupero di calore dai fumi e la successiva produzione di energia elettrica e di calore sono contemporanei alla combustione del rifiuto.

Oltre ai gas di combustione, i residui più importanti del processo sono rappresentati dalle scorie, quasi sempre classificabili come rifiuti speciali, e le ceneri volanti derivanti dalla pulizia delle caldaie e dalla linea di depurazione dei fumi, che rappresentano il flusso più inquinato e che rientrano nella categoria dei rifiuti tossici.

Rifiuti solidi urbani

COMBUSTIONE DIRETTA 2/3

Il vapore viene utilizzato in un ciclo termico con produzione combinata di energia elettrica, che viene immessa nella rete di distribuzione, e di calore, che alimenta una rete di riscaldamento a distanza. I gas ad una temperatura di circa 250°C vengono inviati alla sezione di depurazione, che è notevolmente complessa in conseguenza degli standard di emissione richiesti dalle normative antinquinamento.

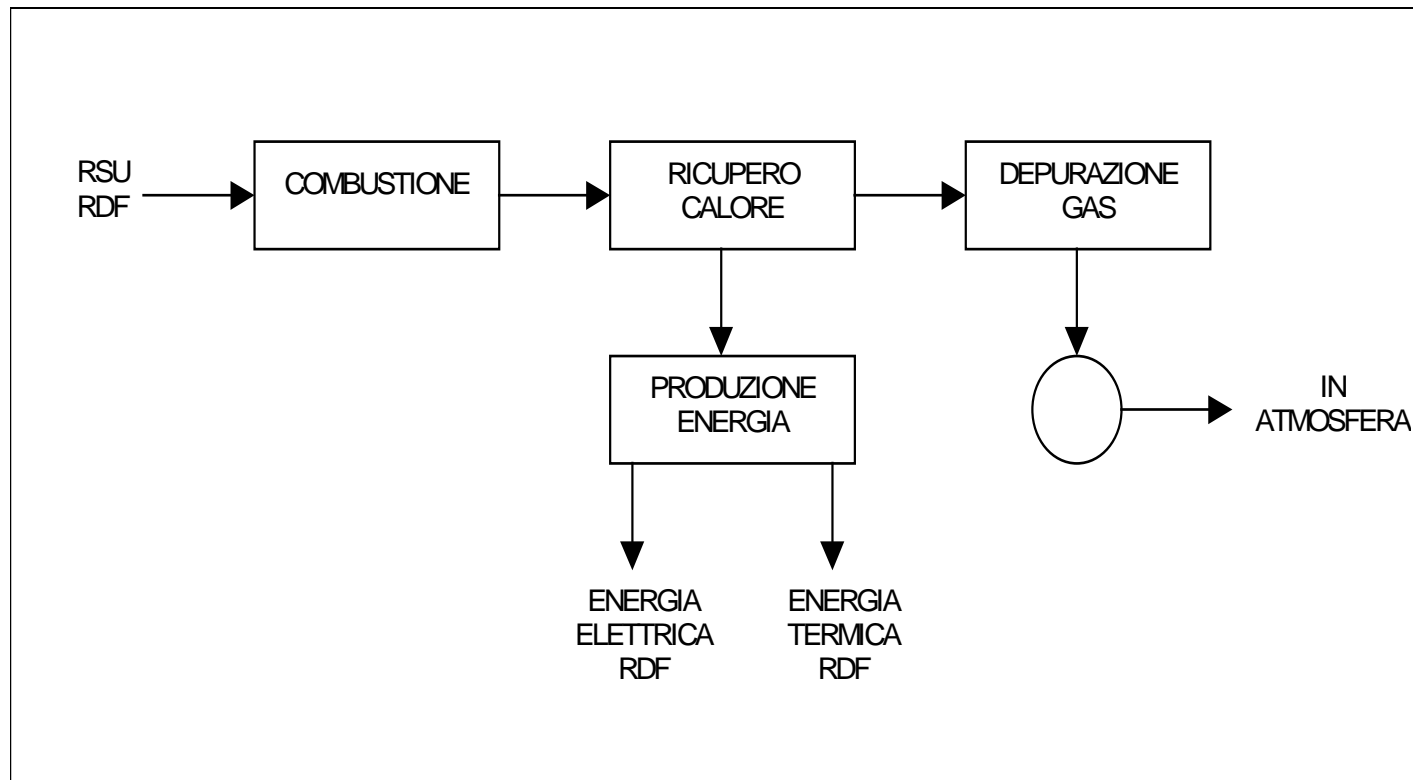
Il recupero di calore dai fumi e la successiva produzione di energia elettrica e di calore sono contemporanei alla combustione del rifiuto.

Oltre ai gas di combustione, i residui più importanti del processo sono rappresentati dalle scorie, quasi sempre classificabili come rifiuti speciali, e le ceneri volanti derivanti dalla pulizia delle caldaie e dalla linea di depurazione dei fumi, che rappresentano il flusso più inquinato e che rientrano nella categoria dei rifiuti tossici.

Rifiuti solidi urbani

COMBUSTIONE DIRETTA

3/3



Schema di un impianto a combustione diretta

Rifiuti solidi urbani

GASSIFICAZIONE

1/4

La gassificazione è un processo che consente di ottenere dal rifiuto solido urbano un combustibile gassoso; comprende una prima fase pirolitica seguita da fenomeni di cracking molecolare, favoriti dall'alta temperatura.

La fase pirolitica avviene in un campo di temperatura di $400\div 700\text{ }^{\circ}\text{C}$, quella di gassificazione con temperature anche superiori a 1500°C ; nei prodotti di pirolisi sono presenti idrocarburi pesanti, mentre la fase di gassificazione produce solitamente componenti a basso peso molecolare. È un processo endotermico e quindi una parte di energia prodotta dal ciclo di recupero deve essere utilizzata nella sezione di pirolisi/ gassificazione.

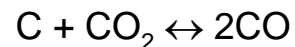
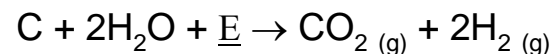
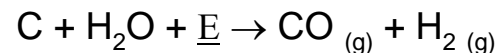
La dissociazione molecolare interessa i composti organici e si attua principalmente attraverso due reazioni simultanee: il cracking termico (pirolisi) e l'ossidazione parziale, seguite poi da una reazione di "reforming".

Rifiuti solidi urbani

GASSIFICAZIONE

2/4

Le molecole organiche complesse presenti nei rifiuti sono trasformate in gas di sintesi, composto essenzialmente da idrogeno molecolare e da monossido di carbonio. In forma semplificata, le reazioni chimiche possono essere così rappresentate:



$\underline{\text{E}}$ rappresenta l'energia che deve essere apportata al processo.

I composti inorganici quali vetro, metalli, ceramica, costituiscono il residuo della fase di gassificazione; se il processo avviene ad alta temperatura fondono e danno luogo alla formazione di un materiale di tipo basaltico inerte a bassissima lisciviabilità, senza rilascio di contaminanti; in particolare i metalli pesanti presenti nel rifiuto trattato entrano nella struttura del materiale basaltico e non sono presenti nell'eluato risultante dalle prove di rilascio in concentrazioni superiori a quelle previste dalla normativa.

Rifiuti solidi urbani

GASSIFICAZIONE

3/4

Nell'ambito delle tecnologie di trattamento termico dei rifiuti con recupero di energia il processo di pirolisi / gassificazione ad alta temperatura presenta i seguenti principali vantaggi:

- l'atmosfera riducente e le elevate temperature nel reattore assicurano la gassificazione completa dei composti organici presenti nei rifiuti e impediscono la presenza di prodotti di demolizione parziale. Le reazioni finali del processo sono inoltre favorite dal fatto che avvengono in fase omogenea (gassosa) con elevata turbolenza;
- i gas di sintesi hanno un potere calorifico compreso tra 10.000 e 12.000 kJ/kg, in funzione alle caratteristiche chimico / fisiche del rifiuto immesso nel reattore; una volta depurati, possono essere stoccati e poi utilizzati per produrre energia, elettrica e termica. I gas di sintesi possono essere raffreddati in tempi molto rapidi; non si possono quindi verificare fenomeni di riformazione di composti organo – clorurati, come avviene nelle fasi di recupero del calore dai gas di combustione negli impianti di termoutilizzazione tradizionali;

Rifiuti solidi urbani

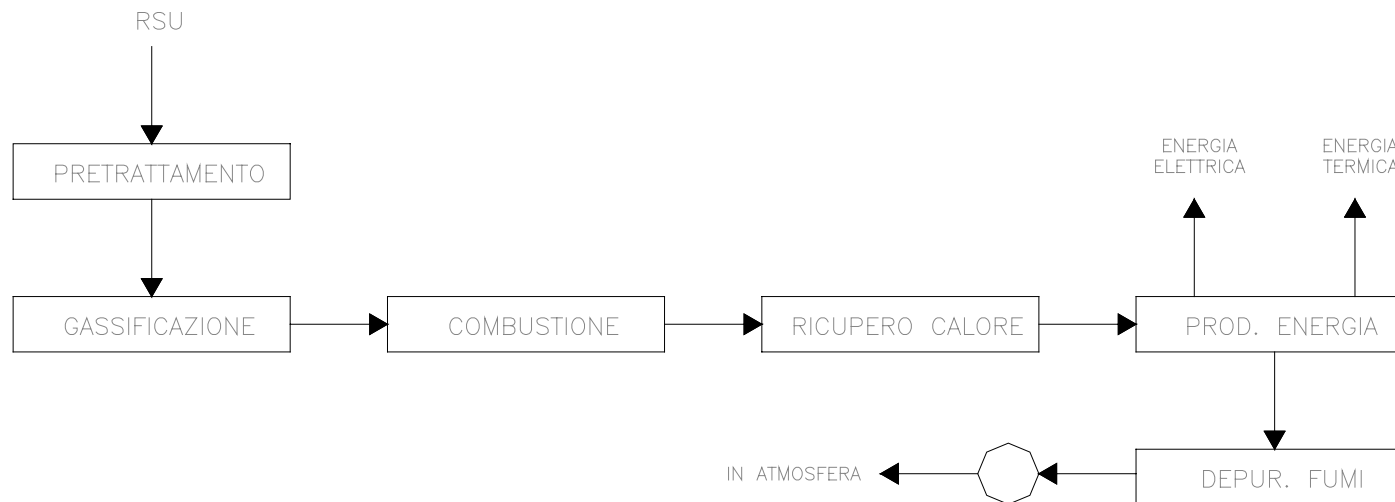
GASSIFICAZIONE

4/4

- non produce composti gassosi inquinanti da immettere in atmosfera; i gas di combustione si formano solo nella fase di recupero dell'energia, quando i gas di sintesi depurati vengono bruciati in un motore primo, turbina a gas o motore a combustione interna. In pratica l'unico inquinante è rappresentato dagli ossidi di azoto, che però possono essere eliminati da un normale impianto di depurazione;
- i composti inorganici presenti nel rifiuto in ingresso vengono fusi e poi vetrificati in una matrice basaltica, che sottoposta alla prove di rilascio produce un eluato con concentrazione dei parametri inquinanti ampiamente inferiori a quelli di legge. Il prodotto risultante è quindi classificabile come inerte e potrebbe anche trovare applicazione quale materiale per sottofondi stradali, come avviene in alcuni paesi europei con prodotti analoghi. Il materiale di risulta è pari a circa il 10% della massa di rifiuto in ingresso ed è inerte, contro circa il 20% di scorie prodotte da un forno tradizionale, che sono classificate come rifiuto speciale, più un 5% di ceneri volanti, che sono classificate solitamente come rifiuto tossico e nocivo.

Rifiuti solidi urbani

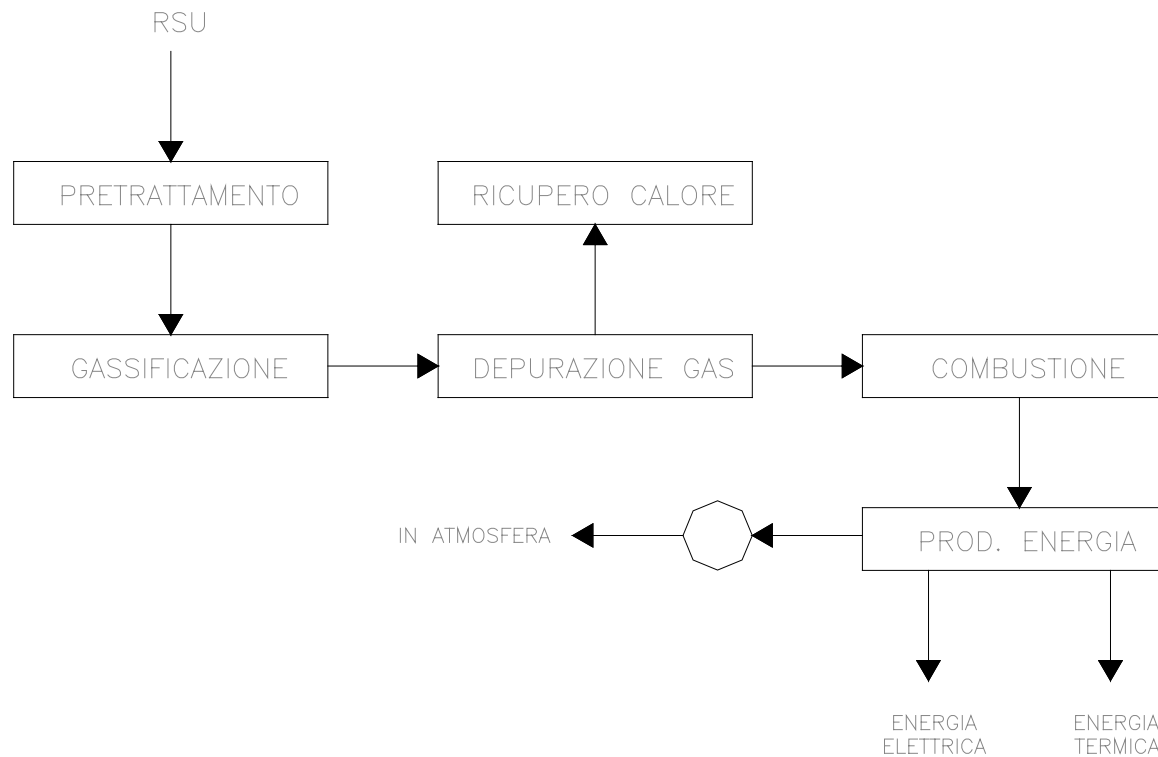
SOLUZIONE A



Schema di un impianto di pirolisi / gassificazione

Rifiuti solidi urbani

SOLUZIONE B



Schema di un impianto di pirolisi / gassificazione