

LA CONVERSIONE DIRETTA DELL'ENERGIA

1. DALLA CONVERSIONE TERMODINAMICA ALLA CONVERSIONE “DIRETTA” DELL'ENERGIA

1.1 LIMITI DELLA CONVERSIONE TERMODINAMICA DELL'ENERGIA

1.1.1. LIMITI TERMODINAMICI

1.1.2. LIMITI TECNOLOGICI

1.1.3. LIMITI ECONOMICO-IMPIANTISTICI

2. PRINCIPALI MIGLIORAMENTI DI PRESTAZIONE DEGLI IMPIANTI DI CONVERSIONE

3. SISTEMI DI CONVERSIONE NON CONVENZIONALE DELL'ENERGIA

Conversione diretta dell' energia

Simbologia

Simboli latini

p	pressione
Q	Quantità di calore
T_{max}	temperatura della sorgente calda
T_{min}	temperatura della sorgente fredda
V	volume

Simboli greci

η_B	rendimento dell' impianto Bottomer
$\eta_{t,Carnot}$	rendimento termodinamico odi Carnot
η_T	rendimento dell' impianto Topper
η_{TOT}	rendimento totale dell' impianto combinato

1. DALLA CONVERSIONE TERMODINAMICA ALLA CONVERSIONE “DIRETTA” DELL’ENERGIA

I processi di conversione dell'energia di cui si tratterà riguardano soprattutto la generazione di energia elettrica che, il più delle volte, è caratterizzata dal passaggio di energia. primaria o secondaria, dalla forma termica a quella meccanica e da quest'ultima in elettricità. Allo stato attuale dello sviluppo, la maggior parte degli impianti di produzione dell'energia elettrica è basata su processi cosiddetti “convenzionali”. Nella pratica, la produzione di energia elettrica attraverso forme convenzionali o “commerciali” di energia primaria riguarda solo l'idroelettricità e la termoelettricità, quest'ultima distinta in base alla fonte energetica cui si attinge (di solito combustibili fossili o non convenzionali (vedi ??), quali biogas. legna e biomasse, rifiuti solidi urbani o industriali, etc., ovvero combustibili nucleari e, più raramente, energia geotermica). Nell'idroelettricità, l'energia meccanica, posseduta in forma cinetica, potenziale o di pressione da una corrente fluida, viene convertita in elettricità grazie all'azione esercitata in una turbina idraulica e da questa su un alternatore.

Nella termoelettricità si prevede produzione di energia termica, conversione di questa in energia meccanica e dell'energia meccanica in elettrica. La maggior parte degli impianti termoelettrici, è alimentata da un combustibile, di solito fossile o nucleare; vi sono alcuni esempi di impianti alimentati dall'energia geotermica.

Nel caso degli impianti geotermoelettrici parte dalla disponibilità di calore endogeno, generalmente posseduto da un fluido geotermico a media entalpia; questo alimenta una turbina, che trasforma l'energia termica in meccanica e la cede ad un alternatore che la converte in elettricità.

Nella Fig. 1 vengono mostrati gli stadi che caratterizzano la catena di processi necessari per giungere alla produzione di elettricità. A parte i casi, relativamente rari nelle applicazioni commerciali, di impianti che impiegano energia termica disponibile in natura (solare o geotermica innanzitutto), il tipo di energia che è alla base di ognuno di tali processi quella chimica, primaria o secondaria posseduta a livello, per così dire, potenziale¹ da un combustibile.

L'energia potenziale dei combustibili fossili viene convertita in energia termica attraverso una reazione chimica di ossidazione (combustione) esotermica, ovvero caratterizzata dallo sviluppo di energia termica², equivalente, in valore assoluto, alla variazione di entalpia che compete alla reazione stessa. Nel caso di combustibili nucleari, si ha una reazione di fissione, ormai applicata diffusamente nella tecnica impiantistica, o di fusione, il cui livello tecnologico di sviluppo non è ancora sufficientemente avanzato per permettere una applicazione nei settori qui di interesse. Il calore, comunque sviluppato, viene successivamente trasmesso ad un fluido elastico, che, evolvendo in opportune macchine (generalmente turbine, ovvero motori volumetrici alternativi) produce lavoro meccanico. Si ha dunque, la conversione dell'energia dalla forma termica a quella meccanica (conversione termodinamica).

Il lavoro meccanico ottenuto viene infine conferito ad un alternatore elettrico, mediante il quale si opera l'ultima conversione dell'energia nella forma elettrica. È opportuno precisare subito che in nessuno dei processi di conversione è possibile convertire interamente l'energia disponibile da una forma all'altra; ciascuno dei passaggi appena presentati è dunque caratterizzato da un rendimento, ossia da un coefficiente che rende conto della frazione di energia convertita, rispetto a quella inizialmente disponibile³.

1.1. LIMITI DELLA CONVERSIONE TERMODINAMICA DELL'ENERGIA

In termini di rendimento, il processo complessivo di conversione termodinamica è assai dispendioso. Negli impianti convertitori termoelettrici convenzionali ciò è dovuto generalmente a limiti termodinamici, tecnologici ed economico-impiantistici. Qui di seguito ne verranno richiamati i principali aspetti.

¹ Si tratta, di fatto, di energia chimica e deriva dalle forze di legame presenti, in particolari sostanze, i combustibili, a livello molecolare ed atomico. Oltre alla forma termica, si manifesta sotto forma di energia elettrica, in funzione della variazione di energia libera, in determinate reazioni di ossidoriduzione, ovvero in funzione della concentrazione di sostanze diverse in determinate soluzioni (in questo caso si parla di energia libera di mescolamento).

² Il calore prodotto viene definito *tonalità termica di reazione* o, più semplicemente, *calore di reazione*.

³ Da un punto di vista qualitativo, il rendimento in questione dà una valutazione dell'efficacia del processo di conversione: più alto è il rendimento, maggiore è la quantità di energia inizialmente disponibile convertita nelle forme desiderate.

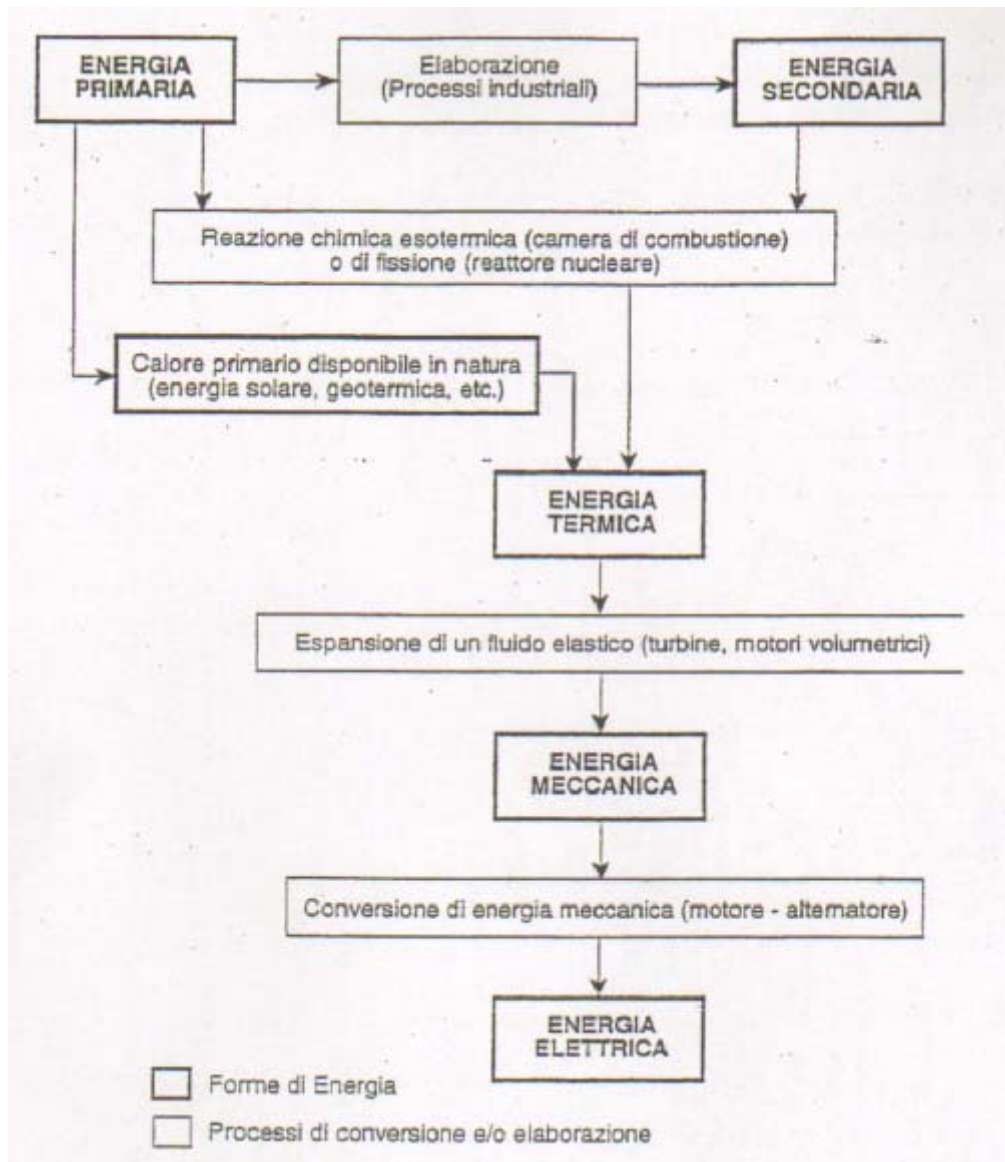


Figura 1 Stadi di conversione e forme di energia intermedie che caratterizzano la generazione per via termodinamica convenzionale di energia elettrica.

1.1.1. LIMITI TERMODINAMICI

Il passaggio da energia termica ad energia meccanica rimane soggetto alle leggi della termodinamica, le quali pongono un limite al rendimento. Tale limite è stato individuato da Carnot, ed espresso mediante un fattore di conversione, detto appunto rendimento termodinamico o di Carnot:

$$\eta_{t,Carnot} = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}} \quad (1)$$

dove T_{\min} è la temperatura assoluta della sorgente fredda, alla quale si deve necessariamente cedere calore non ulteriormente convertibile, mentre T_{\max} è la temperatura della sorgente calda, dalla quale si sottrae la quantità di calore iniziale da convertire.

Dalla eq. (I) si vede che, a parità di temperatura della sorgente fredda, il rendimento di Carnot aumenta con la temperatura della sorgente calda, come mostrato nel grafico di Fig. 2.

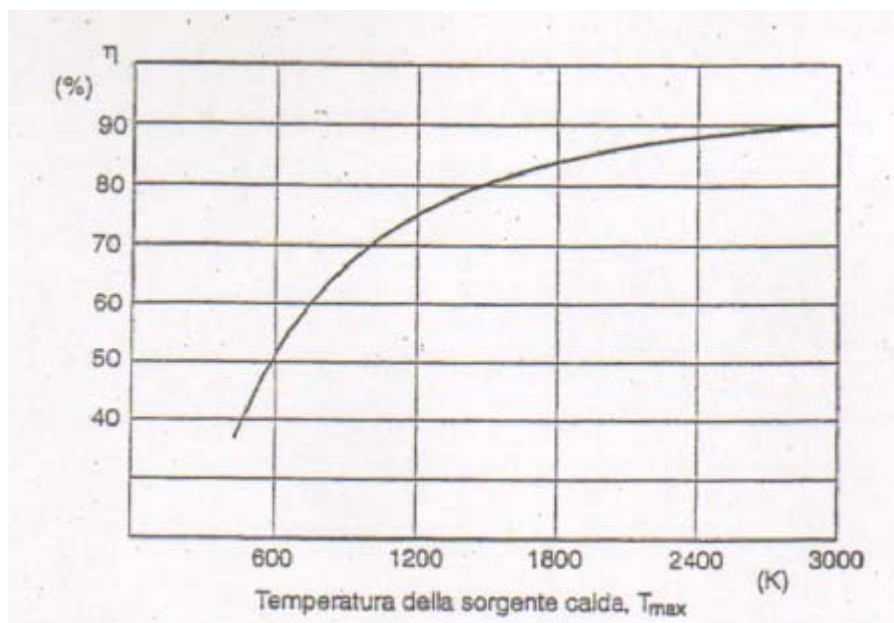


Figura 2 Andamento del rendimento di Carnot in funzione della temperatura T_{max} (per $T_{min} = 288$ K).

È opportuno ricordare che rappresenta il massimo valore dei rendimento di conversione; in un ciclo termodinamico è possibile conseguire tale valore solo in sede ideale.

Un altro effetto che determina un'ulteriore diminuzione del rendimento e che, a ben guardare, può essere considerato una intrinseca conseguenza della eq. (I), è quello dovuto alla molteplicità delle sorgenti, a prescindere dalla presenza o meno di irreversibilità. Il rendimento di un ciclo termodinamico è, infatti, tanto minore quanto più sono vicine le temperature T_{max} e T_{min} e, quindi, quanto più ridotta è l'escursione di temperatura a cui avviene lo scambio di calore in ciascuna trasformazione del ciclo termodinamico.

I limiti di tipo termodinamico hanno un duplice significato. Uno, diretto, comporta l'impossibilità, pur in sede ideale, di convertire l'intera energia termica disponibile in energia meccanica, anche a prescindere dalle limitazioni della macchina a fluido impiegata per la conversione. Il secondo limite riguarda l'entità della perdita di conversione, proporzionale a $T_{min} - T_{max}$, esso attiene a quanto verrà discusso nel prossimo paragrafo.

1.1 .2. LIMITI TECNOLOGICI

Dalla eq. (I) si deduce che il rendimento di Carnot dipende esclusivamente dalle temperature estreme del ciclo. Per quanto riguarda i limiti relativi a tali temperature, è da osservare che la T_{min} va

realisticamente legata alle condizioni ambientali, ovvero la temperatura minima del ciclo è da considerarsi quella dell'ambiente esterno: non è, infatti, possibile predisporre un sistema refrigerante che alteri le condizioni ambientali, creando artificialmente una temperatura $T'_{\min} < T_{\min}$ senza pagare un prezzo termodinamico superiore al beneficio conseguibile.

La T_{\max} che influisce sulle prestazioni della macchina secondo la legge illustrata dal grafico di Fig. 2, ha soprattutto un limite tecnologico, legato alla capacità di resistenza dei materiali alle alte temperature ed alle elevate sollecitazioni meccaniche cui gli stessi materiali vengono sottoposti durante il funzionamento.

In particolare, per gli impianti termodinamici a vapore, occorre notare che, nonostante nel bruciatore del generatore di vapore sia possibile raggiungere temperature dell'ordine dei 2.000 °C, le palette delle turbine non possono, di regola, operare a più di 500÷550 °C, per ragioni di resistenza termomeccanica, appunto. Nelle turbine a gas tali temperature possono essere superiori, ma nelle applicazioni di elettrogenazione (che comportano un funzionamento ininterrotto anche molto lungo) non superano, di solito, i 1250 °C.

Questa pesante limitazione delle temperature di lavoro è una delle principali cause che rendono la conversione termodinamica di gran lunga più onerosa, in termini di rendimento, rispetto agli altri stadi della catena di conversione dell'energia riportata in Fig. 1, incidendo in modo preponderante sul rendimento globale dell'intero processo.

Per fornire un valore orientativo, basta considerare che il rendimento globale di un processo convenzionale a vapore è dell'ordine del 42÷43%, il che implica che quasi il 60% dell'energia immessa nel sistema di conversione non diviene energia utile.

1.1.3. LIMITI ECONOMICO-IMPIANTISTICI

Per quanto si è visto, alcune delle cause che allontanano il processo di conversione termodinamica dai rendimenti unitari sono intrinseche alla natura stessa dei processi e quindi non eliminabili. Altri limiti, invece, vengono posti in essere da cause più propriamente di carattere impiantistico ed economico.

Ad esempio, in un impianto motore termico, il rendimento globale è migliore quanto maggiore è l'espansione del fluido elastico; spingere tale espansione oltre certi livelli è, però, antieconomico. Questa circostanza si riconosce intuitivamente, ad esempio, esaminando il ciclo ideale di Otto-Beau De Rochas relativo ai motori ad accensione comandata (Fig. 3). In questo ciclo l'espansione viene volutamente interrotta nel punto 4, rinunciando ad una ulteriore frazione di lavoro utile (area tratteggiata) che si otterrebbe se il fluido si espandesse fino al punto 4', che, al limite, può addirittura coincidere con 1' che si trova alla pressione $p_{1'} = p_1$. La leggera sovrappressione della

camera di combustione rispetto all'esterno ($p_4 > p_1$) determina, infatti, l'uscita spontanea dei gas combusti, limitando il lavoro di espulsione, e ciò evidentemente rappresenta un vantaggio ed un risparmio nell'economia generale dell'impianto di conversione. Ma decisiva nell'escludere tale prolungamento dell'espansione risulta un'altra considerazione: a fronte di un guadagno di lavoro utile assai limitato (proporzionale all'area $4-4'-1'-1$), il prolungamento dell'espansione comporterebbe un aumento della corsa dello stantuffo cui corrisponde un volume specifico $V_{4'} = V_1$, assai grande ed un conseguente ingombro (e costo) dell'impianto non giustificabile sul piano economico.

Analogamente, nel generico ciclo di un impianto a vapore (ciclo di Hirn), si potrebbe diminuire il valore della pressione all'entrata del condensatore (punto 4, in Fig. 4), per aumentare l'espansione del vapore, accrescendo la frazione di calore convertito in lavoro dell'area tratteggiate ($4, 4', 5', 1''$, $1', 5 = 0$). Una pressione così bassa richiederebbe, però, una sorgente fredda a temperatura eccessivamente ridotta ed un corrispondente volume specifico del vapore troppo elevato, dunque un condensatore di dimensioni eccessivamente grande e troppo costoso, in relazione ai benefici ottenibili.

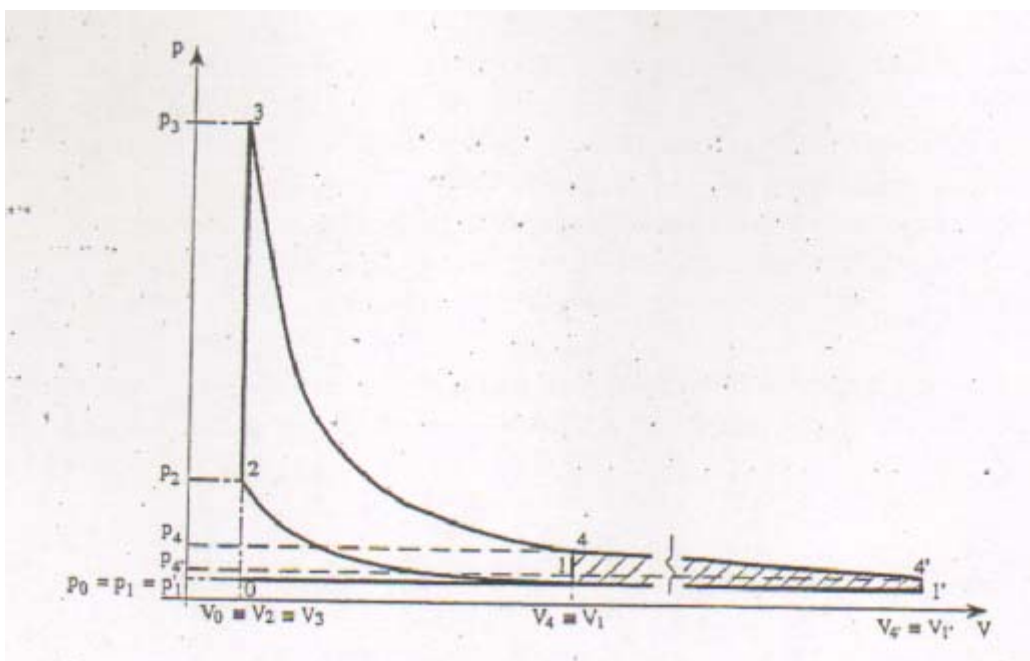


Figura 3 - Ciclo termodinamico di Beau De Rochas per motori ad accensione comandata (1, 2, 3, 4) e sua eventuale prosecuzione (4, 4', 1', 1).

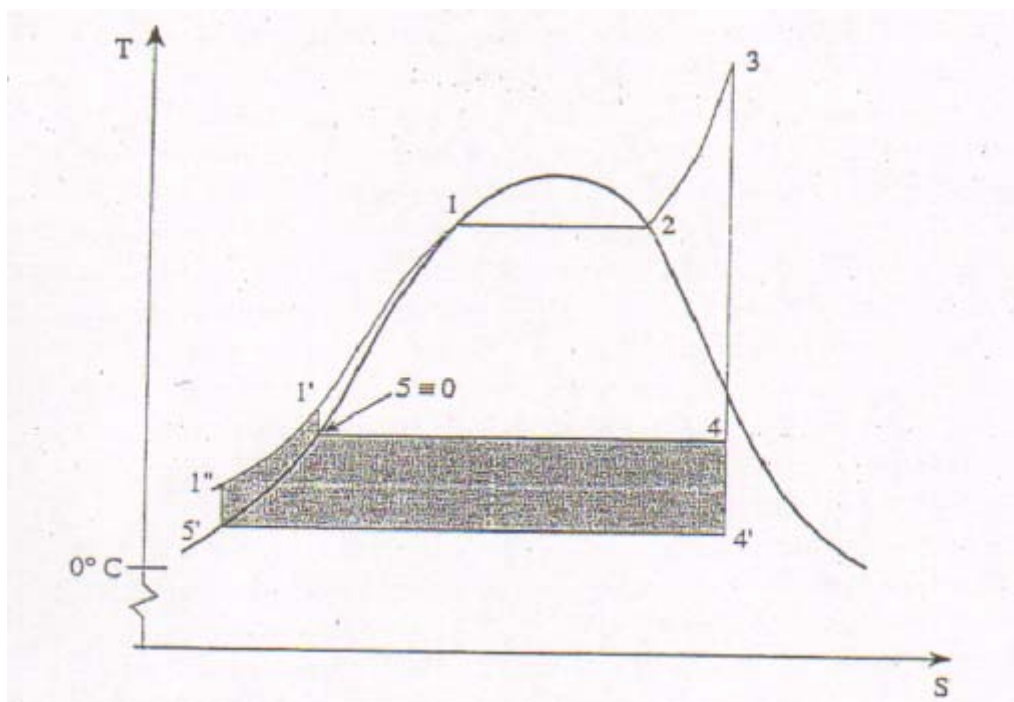


Figura 4 Ciclo termodinamico di Hirn per gli impianti motori a vapore (0, 1', 1, 2, 3, 4, 5 = 0) e sua eventuale prosecuzione (4, 4', 5', 1'' 1', 5, 4).

2. PRINCIPALI MIGLIORAMENTI DI PRESTAZIONE DEGLI IMPIANTI DI CONVERSIONE

Si è osservato, dunque, che gli impianti motori termici convenzionali hanno intervalli di temperatura operativi tipicamente limitati; così, ad esempio, gli impianti motori a vapore hanno temperature massime che difficilmente superano i 550 °C, e con gli impianti turbogas per elettrogenazione non si possono superare i 1250 °C senza ridurre eccessivamente la vita delle palettature.

Appare allora immediato concludere che, tenuto conto della possibile complementarità delle temperature operative, è possibile realizzare impianti combinati, che associno centrali tradizionali in grado di lavorare a temperature massime compatibili con quelle minime dell'altro impianto, in grado di operare nel campo di temperature interdette ai primi.

L'impianto che lavora nel campo di temperature superiore sarà detto "Topper" e quello che lavora nel campo inferiore "Bottomer". Esempi tipici di impianti combinati sono proprio quelli costituiti da unità turbogas che fanno da Topper ad impianti a vapore, Bottomer: i gas di scarico dell'impianto turbogas (eventualmente "rivitalizzati" in un apposito bruciatore) sono in grado di alimentare il generatore di vapore dell'impianto sottoposto (Bottomer, appunto). Il rendimento complessivo di tali impianti può essere determinato in base allo schema di Fig. 5; l'impianto Topper converte l'energia in ingresso Q con rendimento η_T fornendo una quantità utile pari a $\eta_T Q$. Se si assume che la rimanente quota $(1 - \eta_T) Q$ possa essere trasferita interamente

all'impianto Bottomer e che essa verrà convertita con rendimento η_B , si otterrà la quantità utile $\eta_B(1-\eta_T)Q$.

Pertanto l'energia totale utile, Q , in uscita dall'impianto combinato è pari a:

$$Q_{TOT} = \eta_T Q + \eta_B(1-\eta_T)Q = (\eta_T + \eta_B - \eta_T\eta_B)Q \quad (2)$$

Dividendo l'energia totale utile per l'energia entrante, Q , si ottiene il rendimento complessivo, η_{TOT} , ovvero:

$$\eta_{TOT} = \frac{Q_{TOT}}{Q} = \eta_T + \eta_B - \eta_T\eta_B \quad (3)$$

Come si vede, il rendimento complessivo può divenire anche particolarmente elevato. Per esso tuttavia non va ricercato comunque il valore più alto possibile: considerazioni economico-impiantistiche suggeriscono al progettista di optare per il rendimento in relazione al quale si ottiene un risparmio di combustibile tale da giustificare i costi supplementari derivanti dalla maggiore complessità dell'impianto combinato, rispetto a quelli tradizionali.

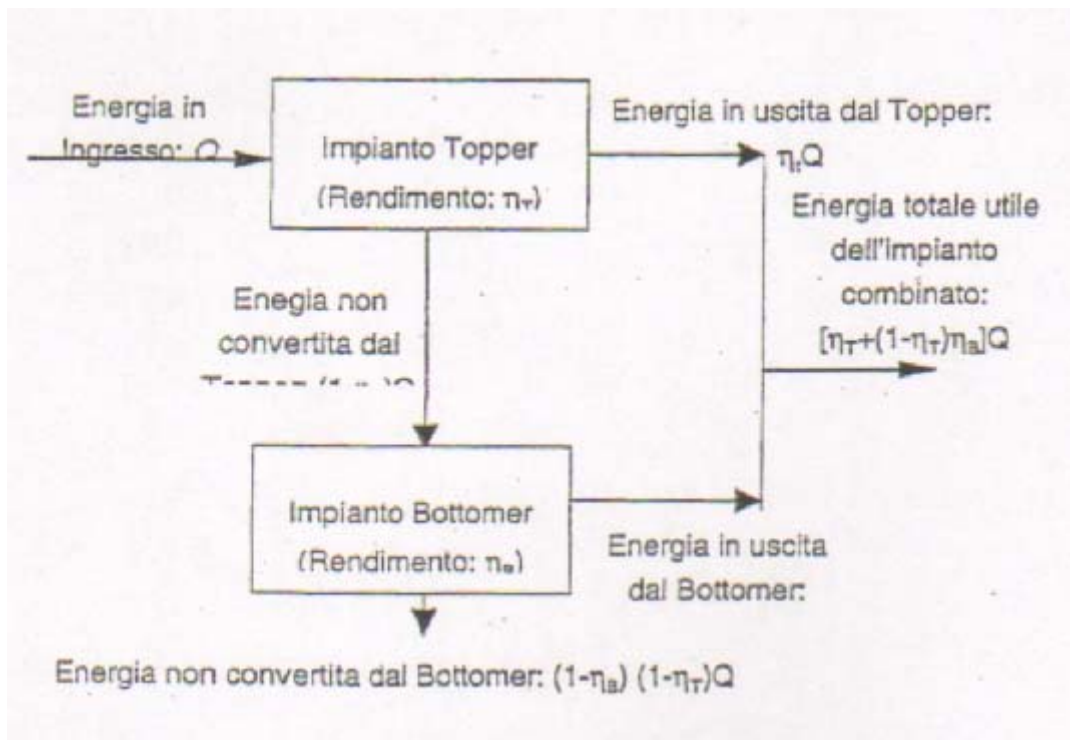


Figura 5 Bilancio energetico di un impianto combinato.

3. SISTEMI DI CONVERSIONE NON CONVENZIONALE DELL'ENERGIA

Come visto, le possibilità di migliorare in misura notevole i processi convenzionali di conversione dell'energia sono legate soprattutto al progresso tecnologico; esse hanno comunque margini esigui ed è per questo che i ricercatori si sono rivolti anche allo sviluppo di altri sistemi, cosiddetti non convenzionali.

Considerato che nei metodi convenzionali di conversione una perdita rilevante di energia, ovvero una caduta notevole di rendimento, si verifica, come accennato, nel passaggio dalla energia termica a quella meccanica (la cosiddetta conversione termodinamica), gli sforzi sono stati concentrati soprattutto nella ricerca di processi di conversione che possano fare a meno di tale passaggio.

L'assenza di parti meccaniche in movimento, in particolare, può consentire il raggiungimento di temperature operative molto più elevate di quelle tipiche dei processi convenzionali; ne risulta pertanto, almeno potenzialmente, un rendimento di conversione maggiore.

Questi processi sono detti di conversione diretta, in quanto convertono un'energia primaria e secondaria direttamente in energia elettrica, senza richiedere il passaggio attraverso uno stadio di energia meccanica.

I metodi di conversione diretta che a tutt'oggi vengono tenuti in considerazione a livello di applicazione industriale o, almeno, di ricerca applicata sono:

- la generazione fotovoltaica (celle solari fotovoltaiche)
- la conversione elettrochimica (celle a combustibile)
- la generazione magnetoidrodinamica (MHD)
- la conversione termoelettrica
- la conversione termoionica.

Negli primi due sistemi citati si ha addirittura l'eliminazione anche del passaggio attraverso l'energia termica, ovvero si realizza l'effettiva conversione diretta di energia primaria o secondaria in energia elettrica.

In Fig. 6 è riportato uno schema dei passaggi energetici che caratterizzano i processi di conversione diretta, finalizzati alla produzione di energia elettrica.

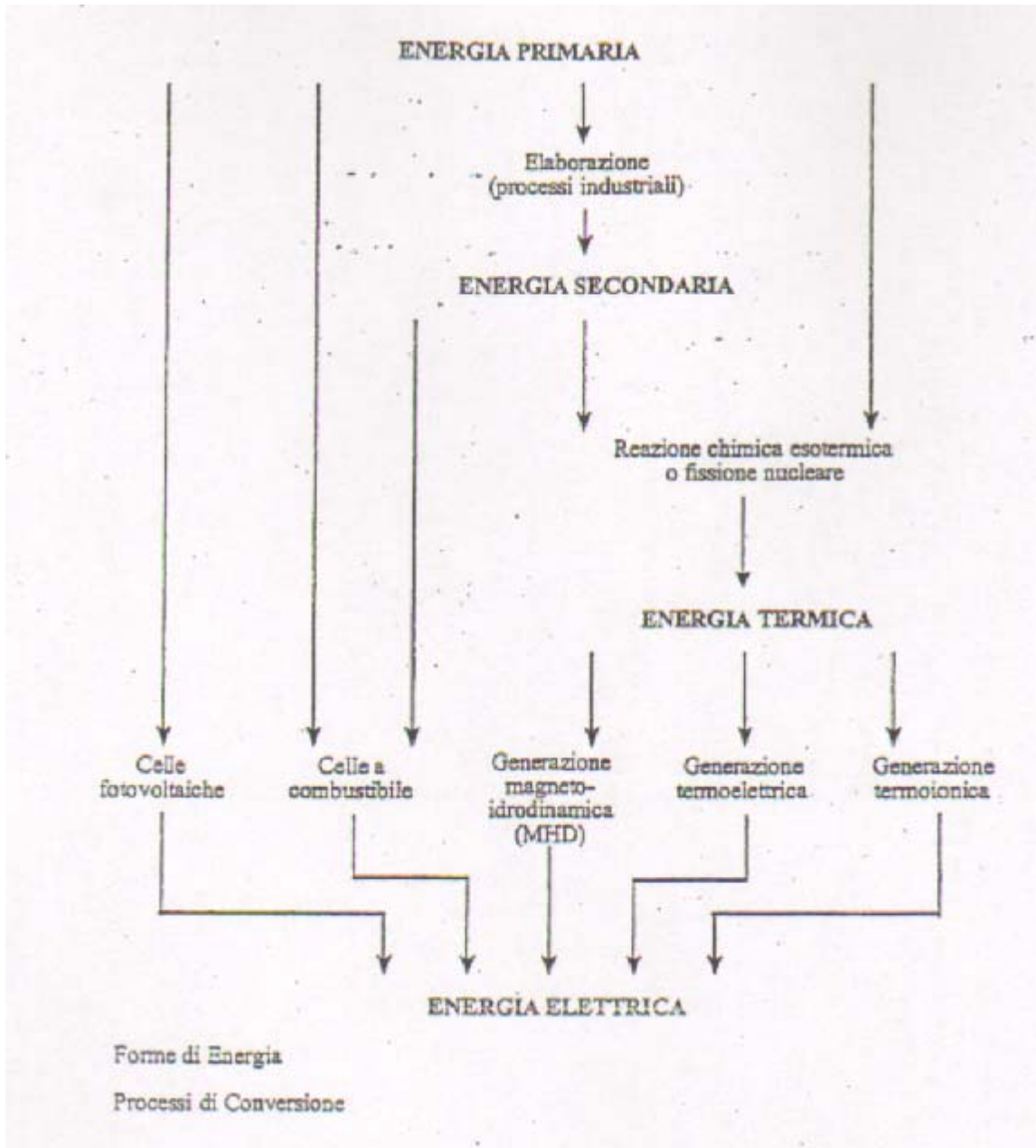


Figura 6 Stadi di conversione energetica nella generazione “diretta” dell’energia elettrica.