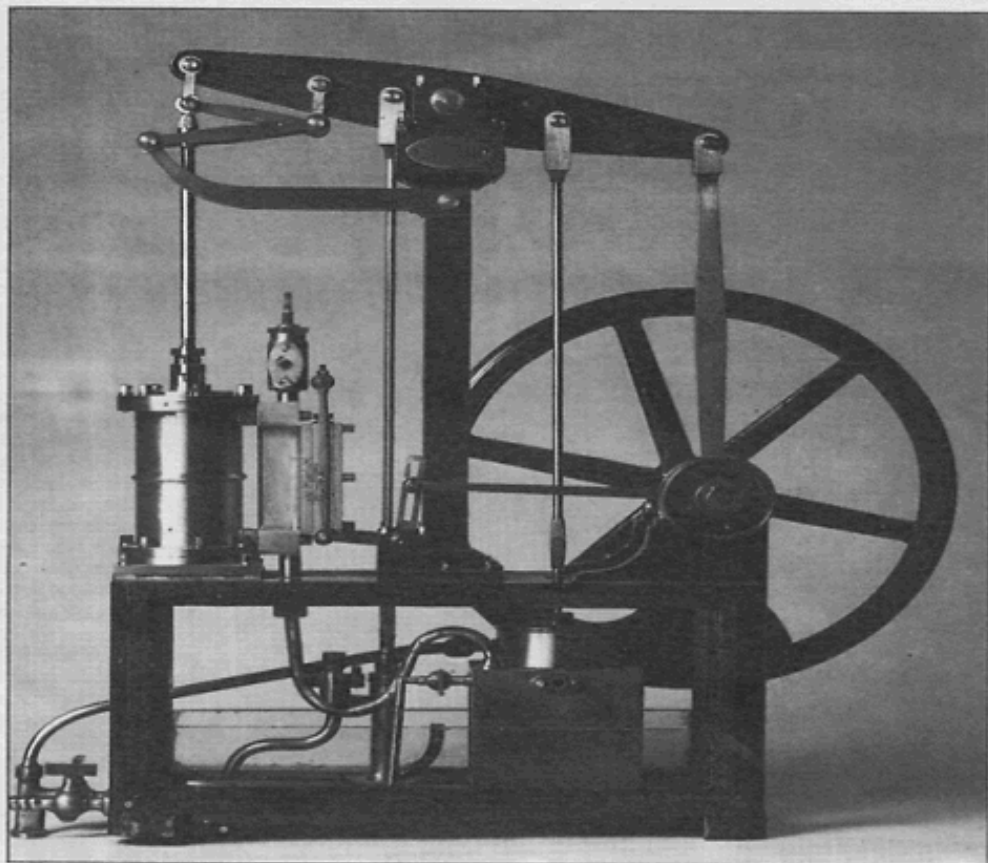


Roberto Renzetti

Macchine termiche e combustibili

*L'entropia e i rendimenti in termodinamica,
ovvero come trarre il massimo utile
da un combustibile.*



Quando l'energia meccanica per determinati usi era fornita dagli schiavi e dagli animali, ci si poteva preoccupare di avere più schiavi, più animali ed una agricoltura che servisse a mantenere in vita coloro che fornivano l'energia richiesta. Quando l'energia meccanica era fornita da macchine idrauliche o dal vento, ci si poteva preoccupare di questioni meteorologiche. Quando l'energia meccanica è fornita da macchine termiche, occorre preoccuparsi del combustibile.

Le macchine termiche sono quegli strumen-

ti che permettono la trasformazione di calore in lavoro meccanico. Si dispone di un dato combustibile: esso viene bruciato in questa macchina; l'energia liberata dalla combustione viene opportunamente trasformata in energia meccanica che, essenzialmente, è movimento.

Macchine di questo tipo sono relativamente recenti: esse furono introdotte massicciamente nei processi produttivi intorno alla metà del secolo scorso. Risolta la miriade di problemi tecnologici che esse ponevano, rimaneva il problema del combustibile: fintan-

toché esso fu a buon mercato ci si occupò poco del problema ma, presto, si cominciarono a far sentire le prime crisi energetiche. Spogliate le foreste si passò al carbone, quindi al petrolio ed ora all'energia nucleare. Diversi combustibili per epoche diverse e per necessità produttive sempre maggiori. Ma, al di là di ogni altra questione, pur fondamentale, rimane il problema dei costi dei combustibili, legato, a tempi più o meno lunghi, alla loro disponibilità.

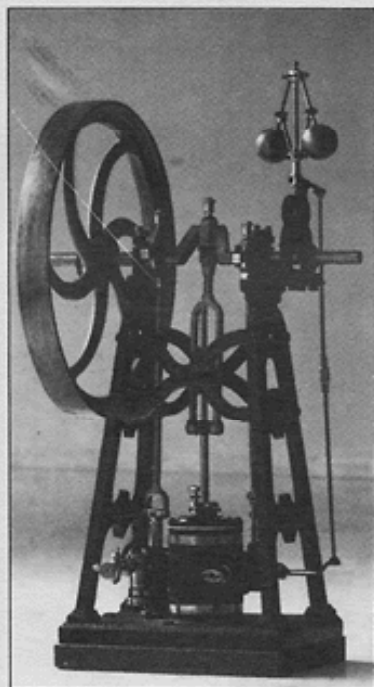
Un combustibile è quindi un qualcosa da cui si può tirar fuori dell'energia: oltre a quella direttamente termica, energia meccanica, energia di gran qualità, molto richiesta sul mercato. È chiaro che bruciando un combustibile per produrre calore, il fine è raggiunto completamente: tutto il combustibile brucia, tutto diventa calore. Il problema è più delicato nel caso in cui si bruci un combustibile per produrre lavoro meccanico. Sembra che l'intermediario (la macchina termica) si prenda una commissione (una tangente) ogni volta che fa una trasformazione.

Insomma il problema è il seguente: come è possibile trarre il massimo utile (nella nostra accezione: il massimo lavoro meccanico) da una data quantità di un dato combustibile?

Il problema fu affrontato per la prima volta (1824) dal fisico francese Sadi Carnot. Egli si costruì mentalmente una macchina termica esente da ogni difetto: una macchina perfetta (ideale) la quale avrebbe trasformato calore in lavoro meccanico nel modo più redditizio possibile. Lo studio teorico del problema portò Carnot a conclusioni di enorme importanza: se alimentiamo questa macchina ideale con una quantità di calore Q_2 , il lavoro meccanico L che otteniamo non potrà mai essere uguale all'energia equivalente a Q_2 . Perché? La macchina per funzionare ha bisogno di scaricare verso l'esterno parte del calore che gli viene fornito, deve cioè buttar via una parte Q_1 del calore Q_2 che la alimenta. Quanto qui detto si può dir meglio in altro modo: una macchina termica, per funzionare deve disporre di due sorgenti di calore a temperature diverse: la sorgente calda a temperatura T_2 che fornisce la quantità di calore Q_2 e la sorgente fredda a temperatura T_1 che assorbe la quantità di calore Q_1 . In definitiva il lavoro meccanico che può dare la macchina ideale di Carnot è: $L = Q_2 - Q_1$.

È immediata una conclusione: se si dispone di una sola sorgente, alla temperatura che si vuole, è impossibile far funzionare una macchina termica. E ciò si può dire ancora

in altro modo, che poi non è altro che l'enunciato di Kelvin-Planck del secondo principio della termodinamica: è impossibile realizzare una trasformazione il cui unico risultato sia quello di assorbire calore da un serbatoio caldo e di convertirlo completamente in lavoro meccanico (se ciò fosse possibile, utilizzando l'acqua del mare come serbatoio caldo, si potrebbero far camminare le navi all'infinito; utilizzando l'aria come serbatoio caldo, potrebbero funzionare all'infinito anche le centrali elettriche;...).



Modello di macchina a vapore a sistema verticale.

Quindi una macchina termica deve scaricare all'esterno parte del calore che gli forniamo per poter funzionare. Due esempi dovrebbero convincerci: il frigorifero che scarica calore dalla sua parte posteriore (quella serpentina che si trova dietro il frigorifero è proprio un radiatore, uno strumento che serve a liberarsi rapidamente del calore che la macchina cede verso l'esterno. E questo è il motivo per il quale il costruttore raccomanda sempre di tenerlo distanziato dalla

parete, proprio per permettere una maggiore «radiazione» del calore) e la vostra automobile che scarica calore attraverso il radiatore dell'acqua ed i gas di scarico.

Tanto vale, a questo punto, introdurre anche l'altro fondamentale principio della termodinamica, il primo (che, a dimostrazione di una non consequenzialità tra i due, fu enunciato da Helmholtz nel 1847, una ventina d'anni dopo i lavori di Carnot). Il primo principio non è altro che il principio di conservazione dell'energia: in un sistema isolato nel quale avvenga una trasformazione ciclica³ di calore in lavoro (o viceversa), nel bilancio energetico bisogna tener conto di tutte le quantità in gioco (lavoro fornito o sottratto, calore fornito o sottratto); in questa ipotesi, la somma di tutte le energie (meccaniche e termiche) che abbiamo all'inizio della trasformazione è uguale a tutte le energie (meccaniche e termiche) che abbiamo alla fine della trasformazione.

Il primo principio nega quindi che sia possibile in natura creare o distruggere energia. Il secondo principio invece nega che sia possibile utilizzare energia a nostro piacimento, nega cioè alcune trasformazioni di calore in lavoro.

Dunque, il lavoro meccanico che può essere prodotto da una macchina termica ideale è $L = Q_2 - Q_1$. Si definisce rendimento del primo ordine (e si capirà più oltre il motivo del complemento di specificazione) la quantità r data dal rapporto tra il lavoro meccanico L che una macchina termica produce e l'energia (la quantità di calore) Q_2 che ad essa viene fornita:

$$r = \frac{\text{lavoro meccanico ottenuto}}{\text{calore che viene fornito}} = \frac{L}{Q_2}$$

Poiché $L = Q_2 - Q_1$, sostituendo questa quantità nella relazione precedente, si trova:

$$r = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} = \frac{Q_2}{Q_2} - \frac{Q_1}{Q_2} = 1 - \frac{Q_1}{Q_2}$$

Quindi il rendimento di una macchina termica è dato dal numero 1 al quale viene sottratta una certa quantità Q_1/Q_2 . Capiamo meglio. Se risultasse $r = 1$, ciò vorrebbe dire che tanta energia abbiamo fornito (Q_2), tanto lavoro meccanico abbiamo ottenuto (L). Il primo principio della termodinamica ci assicura che questo è il massimo che noi potremmo ottenere: rendimento 1 vuol dire rendimento del 100%. Se risultasse $r = 0$, ciò vorrebbe dire che noi forniamo energia termica senza che la macchina faccia alcun la-

voro meccanico: peggio di così è impossibile. Quindi r è un numero compreso tra 0 ed 1. Ciò che però interessa è osservare che, anche per una macchina ideale, r risulta sempre minore di 1. Al numero 1 va infatti sottratta la quantità Q_1/Q_2 che è sempre minore di 1 (per definizione di Q_1 e Q_2) e, ciò che è peggio, è sempre diversa da 0 (per quanto ci ha insegnato Carnot: è infatti impossibile che Q_1 sia uguale a 0 se si vuole far funzionare una macchina termica).

Affinché il rendimento sia il maggiore possibile si deve cercare di rendere il più piccolo possibile il rapporto Q_1/Q_2 . Poiché si può dimostrare che per una macchina di Carnot sussiste l'identità seguente:

$$r = 1 - \frac{Q_1}{Q_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

dove T_1 e T_2 sono le temperature assolute corrispondenti rispettivamente alla sorgente fredda e calda, risulta evidente che rendere minimo Q_1/Q_2 equivale a rendere minimo T_1/T_2 . Quest'ultimo rapporto si può rendere minimo lavorando con due sorgenti che abbiano il massimo possibile di differenza di temperatura (T_1 molto piccola e T_2 molto grande: una frazione con denominatore grande e numeratore piccolo è un numero piccolo). È importante però osservare che questo è il rendimento di una macchina ideale; nel caso avessimo a che fare con una macchina reale, il numero r sarebbe più piccolo (a volte di molto) di quello ottenuto per la macchina ideale.

Un esempio può servire ad illustrare meglio quanto detto. Vogliamo calcolare il rendimento di una locomotiva a vapore che ha una caldaia che porta l'acqua alla temperatura di 127°C ($= 400^\circ\text{K}$), sapendo che la temperatura della sorgente fredda (ambiente) è di 27°C ($= 300^\circ\text{K}$). Si ha:

$$r = 1 - \frac{300}{400} = 1 - \frac{3}{4} = \frac{1}{4} = 25\%$$

Ebbene, sì: l'esempio da noi fatto, che non si discosta molto dalla realtà, ci dice che solo il 25% del calore che noi forniamo diventa lavoro meccanico. E questo nell'ipotesi che la nostra locomotiva sia una macchina ideale di Carnot. Ciò evidentemente non è, e quindi il rendimento di una tal locomotiva sarà sempre certamente inferiore al 25%.

Come si vede il concetto di rendimento (del primo ordine) è estremamente utile per capire che uso stiamo facendo di un dato combustibile. Esso ci può inoltre far capire il modo di migliorare le cose. Nell'esempio fat-

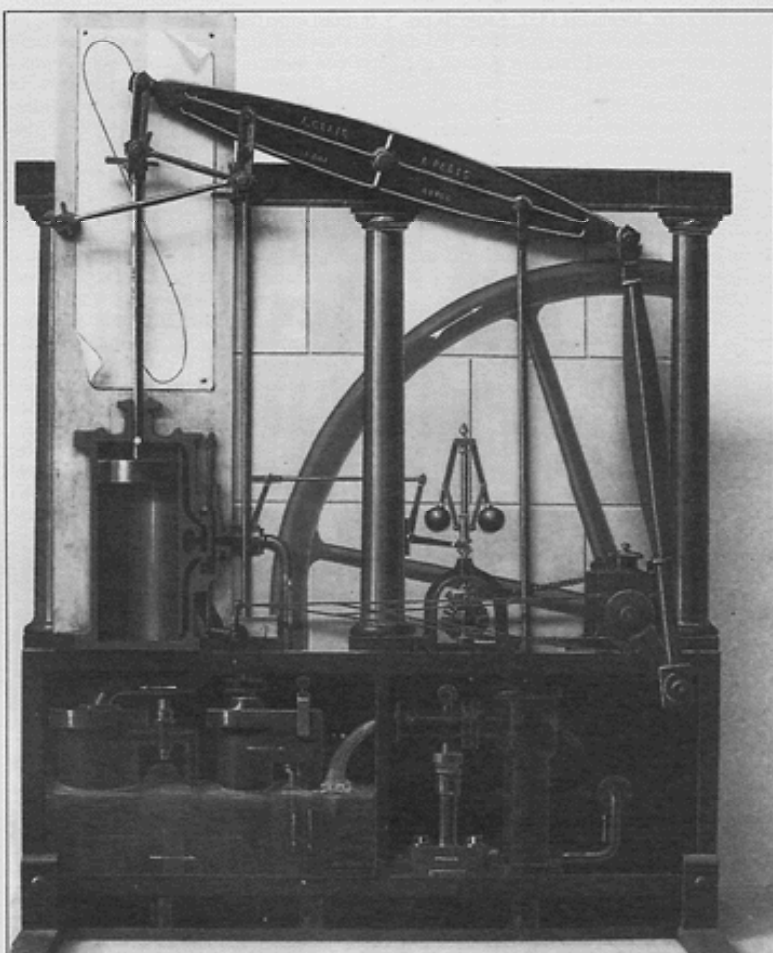


Tavola didattica di una macchina di Watt.

to, poiché è molto dispendioso abbassare la temperatura della sorgente fredda (per far ciò occorre disporre di un apparato che consuma energia e che ha un suo rendimento), dovremo accontentarci di aumentare la temperatura di lavoro del fluido presente nella macchina. M alte temperature significano alte pressioni e quindi contenitori a pressione più massicci, più pesanti. Occorrerà quindi aumentare la temperatura compatibilmente con gli altri parametri in gioco (se, ad esem-

pio, l'aumento di 10°C di temperatura dovesse comportare il raddoppio del peso della locomotiva ed un suo aumento di prezzo del 50%, state tranquilli che ci si accontenterebbe del rendimento suddetto. Vi sono poi altre compatibilità legate al tipo di materiale con cui è fatta una macchina perché, ad esempio, con l'acciaio non si possono superare i 600°C).⁵

Per un minimo di completezza e per quanto ci servirà è utile accennare ad una macchi-

na termica che, ideata nel 1852, è solo da poco studiata in modo approfondito a fini di sfruttamento commerciale (da quando si è capito, speriamo, che l'energia è più preziosa della macchina). Sto parlando della pompa di calore, una macchina che funziona in modo opposto rispetto ad un normale frigorifero. Mentre nel frigorifero si preleva calore da un ambiente, raffreddandolo, per mezzo di un motore che fornisce il lavoro necessario e che, contemporaneamente, disperde del calore verso l'ambiente esterno, in una pompa di calore si preleva del calore dall'ambiente esterno (aria, mare, fiumi) per riversarlo in un ambiente da riscaldare, per mezzo di un motore che fornisce il lavoro necessario e, contemporaneamente, aiuta a riscaldare l'ambiente con il calore che esso sviluppa a causa di attriti, effetti termici della corrente, ecc. In sostanza, mentre nel frigorifero cerchiamo di raffreddare un ambiente riscaldando contemporaneamente l'esterno, nella pompa di calore si cerca di riscaldare un ambiente raffreddando contemporaneamente l'esterno. Viene, in definitiva, «pomato» del calore dall'ambiente esterno (troppo «debole» per essere utilizzato direttamente) portandolo a temperatura più elevata; questo calore, a temperatura più alta viene poi immesso in un altro ambiente per il suo riscaldamento. Tutto ciò avviene utilizzando l'energia meccanica fornita dal compressore che trasforma il calore di bassa qualità (bassa temperatura) in calore di buona qualità (alta temperatura). Come vedremo, questa macchina ha delle ottime prestazioni. Per quel che riguarda il rendimento, in questo caso, poiché viene fornito del lavoro meccanico L per ottenere del calore Q_2 , si avrà:

$$r = \frac{Q_2}{L} = \frac{\text{calore ottenuto}}{\text{lavoro fornito}}$$

e si parlerà, anziché di rendimento, di *coefficiente di prestazione* o di *effetto utile riscaldante*. Analogamente a quanto visto precedentemente, si può facilmente vedere che, nel caso in cui la nostra pompa funzioni come una pompa di Carnot, vale la seguente uguaglianza:

$$(*) \quad r = \frac{Q_2}{L} = \frac{1}{1 - \frac{T_1}{T_2}}$$

$$\text{--- } L = Q_2 \left(1 - \frac{T_1}{T_2} \right)$$

(è quasi superfluo osservare che, da come sono state definite tutte le grandezze, in accordo con quanto visto prima risulta sempre $r > 1$). È questa una conseguenza del fatto che la quantità di calore Q_2 , non costando niente, non influisce sull'energia che viene spesa. È invece utile osservare che, contrariamente a quanto avviene per il normale rendimento, l'effetto utile riscaldante è tanto maggiore quanto minore è la differenza tra le temperature T_1 e T_2).

Le cose che abbiamo fino a qui detto erano già note intorno alla metà del secolo scorso. Il concetto di rendimento è stato molto utile, largamente utilizzato e molto redditizio in termini «economici». Risolve tutti i problemi? Per capirlo è stato necessario passare attraverso l'ultima crisi energetica del 1973. E, proprio nel 1974, vi sono state delle importanti novità. La termodinamica che dormiva quieta e soddisfatta dei numerosi successi che per suo tramite erano stati conseguiti, si è bruscamente risvegliata con una impennata che riguarda proprio il concetto di rendimento.

Supponiamo di voler schiacciare una noce. Né il primo né il secondo principio della termodinamica ci impediscono di farlo con un maglio a vapore. Calcoliamoci, con le formule ora viste, il rendimento del maglio: supponiamo sia del 30%. Ed allora andiamo a schiacciare la noce. Benissimo, ma qualcuno può obiettare che abbiamo impiegato male l'energia perché non abbiamo lavorato con una macchina che ci dà il massimo rendimento possibile, relativamente ad un maglio ideale (che lavori con un ciclo di Carnot) che prevede, ad esempio, un rendimento del 45%. Ed allora, poiché bisogna risparmiare energia, occorre lavorare per migliorare quel rendimento del 30% e portarlo sempre più vicino a quello ideale del 45%. Ci costruiamo un maglio più sofisticato: abbiamo eliminato al massimo gli attriti, lavoriamo con un fluido che si avvicina molto a quello ideale, facciamo fare le trasformazioni nel modo più lento possibile. Siamo ad un rendimento del 40%. Ottimo risultato: ora nessuno ci potrà più dire che sprechiamo energia per schiacciare la noce!

Ma c'è qualcuno, che fino ad ora non ha detto nulla perché sentiva parlare solo grossi tecnici e perché pensava di lire cose ridicole, che timidamente dice: «Scusate, ma non era più semplice usare uno schiaccianoci?». Questa favoletta non è assurda come potrebbe sembrare. Essa rispecchia in modo abbastanza fedele la situazione nella quale noi og-

gi ci troviamo ad utilizzare gran parte dell'energia: schiacciamo noci con un maglio e giriamo con una Ferrari dentro Roma, (e neanche a pensare che tutto ciò sia una scelta individuale del singolo cittadino). In sostanza si tratta di questo: l'uso che noi facciamo dell'energia è il più appropriato per gli scopi che ci prefiggiamo?

Per rispondere a questa domanda è stato introdotto, da alcuni fisici statunitensi della società Americana di Fisica (APS), un altro tipo di rendimento, chiamato del 2° ordine, per distinguerlo dal precedente. Il rendimento del secondo ordine ci dà informazioni sulla bontà delle nostre scelte nell'uso di una determinata fonte energetica. Esso permette di passare da un fattore di quantità (rendimento del 1° ordine) ad un fattore di qualità. Vediamo di cosa si tratta, riferendoci ai lavori originali in cui i fisici dell'APS trattano la questione⁶.

Dopo aver spiegato che il problema principale che intendono affrontare è un migliore uso dell'energia anche attraverso l'educazione dei consumatori, i fisici dell'APS affermano di aver concentrato il loro lavoro su tre categorie di usi finali di energia: la casa, l'automobile ed i processi industriali. Come ottenere un uso più efficiente dell'energia? «L'uso del primo principio della termodinamica è inadeguato per fornire il *minimo percorso energetico* adatto al conseguimento di una data prestazione mediante qualsiasi dispositivo o sistema. Sappiamo che l'energia non si perde; dal punto di vista del primo principio il compito di minimizzare i consumi di energia appare essere principalmente un compito finalizzato ad accumulare la maggiore quantità possibile di energia. Ma noi sappiamo anche che, in ogni processo che coinvolge del calore, le limitazioni del secondo principio della termodinamica, dell'inesorabile aumento dell'entropia⁷, usualmente garantiscono che non tutta l'energia può essere trasformata in modo utile (...). Noi abbiamo trovato che una misura più utile dell'efficienza è il rendimento del secondo ordine definito, per un dispositivo o sistema che debba trasferire lavoro o calore (non ambedue), come:

$$e = \frac{\text{calore o lavoro ottenuto da un dato dispositivo o sistema}}{\text{massimo calore o lavoro che può essere utilmente ottenuto per ottenere lo stesso effetto da un qualsiasi dispositivo o sistema che usi la stessa energia in ingresso del dato dispositivo o sistema}}$$

Da questa definizione discende come conseguenza che il massimo valore di ϵ è 1 in tutti i casi. Il numeratore poi, nel rapporto ora definito, è lo stesso che si ha nel rendimento del primo ordine. Il nuovo denominatore rappresenta un semplice ma fondamentale cambiamento perché introduce direttamente nella definizione di rendimento le leggi della termodinamica. Il massimo che compare nel denominatore vuol ora dire il massimo teorico permesso dal primo e dal secondo principio della termodinamica. Si noti che si tratta della massima *prestazione*, non del massimo che si può ottenere da un dato *dispositivo*.

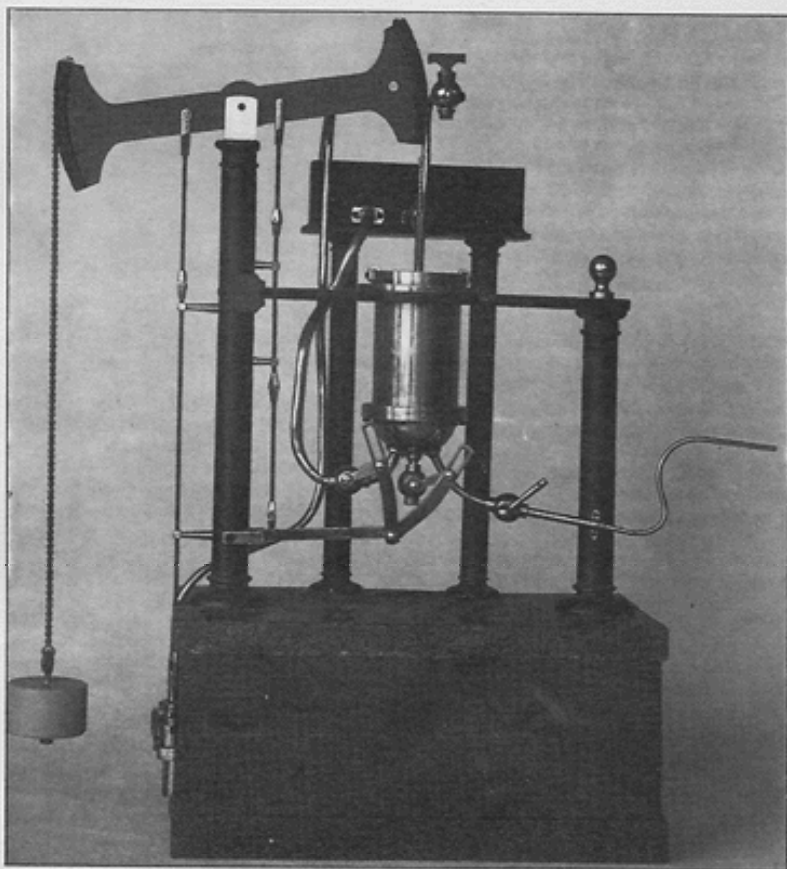
Il rendimento del secondo ordine permette immediatamente di riconoscere la qualità della prestazione di qualunque dispositivo relativamente a quello che esso dovrebbe idealmente essere, mostrando come, in teoria, vi sono molte possibilità di miglioramento. Esso misura lo spreco di combustibile (parte del quale è, naturalmente, inevitabile). Per ogni prestazione specifica che richieda calore o lavoro, il massimizzare ϵ equivale a minimizzare il consumo di combustibile. Nel caso in cui non sia in gioco il consumo di combustibile — come quando si ha a che fare con impianti idroelettrici, impianti a vento, campi geotermici o collettori solari — il massimizzare ϵ ha una ricaduta sull'investimento di capitale nelle unità produttrici di potenza. Inevitabilmente, quindi, la massimizzazione di ϵ diventa materia per considerazioni *politiche*.

Si tratta di un obiettivo tecnico, che si accompagna ad obiettivi economici, ambientali e di conservazione dell'energia, che deve essere conseguito.»

Cerchiamo di capire meglio iniziando con il dare un'altra definizione di rendimento del secondo ordine:

$$\epsilon = \frac{\text{minimo lavoro necessario per ottenere un dato effetto}}{\text{effettivo lavoro utilizzato per ottenere in pratica il dato effetto}} = \frac{L_{\min}}{L_{\text{eff}}}$$

Un esempio può rendere molto chiaro l'uso che si può fare di questa formula. Supponiamo di voler riscaldare una stanza a 22°C ($T_2 = 295^\circ\text{K}$) quando la temperatura dell'ambiente esterno è di 7°C ($T_1 = 280^\circ\text{K}$) utilizzando un bruciatore a gasolio, quello che comunemente si usa nei condomini. Questa macchina termica abbia una fiamma di 1000°C ($T_3 = 1273^\circ\text{K}$) ed un rendimento r del primo ordine tra i migliori, $r = 0,60 = 60\%$. Qual è il rendimento ϵ del



Modello di macchina di Newcomen.

secondo ordine per un tale apparato utilizzato al fine descritto? Occorre innanzitutto calcolarsi l'effettivo lavoro fatto dalla nostra macchina, lavoro che viene utilizzato per ottenere in pratica l'effetto dato, cioè quello di riscaldarci la stanza. Con un poco di conticini, si trova: (12)

$$L_{\text{eff}} = \frac{Q_2 \left(1 - \frac{T_1}{T_3}\right)}{r}$$

Si tratta poi di calcolarsi il minimo lavoro necessario per riuscire a riscaldare la stanza. Ebbene, questo minimo lavoro ce lo può fornire solo una pompa di calore funzionante come una macchina di Carnot*. Confrontando con la seconda delle relazioni segnate con (*), si ha subito:

$$L_{\min} = Q_2 \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right)$$

Andiamo allora a farci il conto sostituendo i valori a nostra disposizione:

$$\begin{aligned} \epsilon &= \frac{L_{\min}}{L_{\text{eff}}} = \frac{Q_2 \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right)}{\frac{Q_2 \left(1 - \frac{T_1}{T_3}\right)}{r}} = \\ &= r \cdot \frac{1 - \frac{T_1}{T_2}}{1 - \frac{T_1}{T_3}} = 0,60 \cdot \frac{1 - \frac{280}{295}}{1 - \frac{280}{1273}} = 0,036 \end{aligned}$$

e cioè: $\epsilon = 3,6\%$!

È un risultato clamoroso: utilizzare del gasolio che brucia 1000 °C per riscaldare un ambiente a 22 °C è un vero e proprio scempio energetico! Il calore ad elevata temperatura è energia di estremo pregio: essa è in grado di darci un'altra energia di gran pregio, il lavoro meccanico. Al contrario, il calore a bassa temperatura è energia molto poco pregiata: essa non riesce a darci lavoro meccanico. Perché allora sprecare in questo modo l'energia pregiata? Una serie di possibili risposte le possiamo solo accennare, tenendo conto di quello che anche i fisici dell'APS ammettono (discutere del rendimento del secondo ordine è discutere di politica): mancanza di volontà politica, interessi economici, consuetudini, pigrizia mentale, non conoscenza dei problemi, costi iniziali elevati.

Ma torniamo al rendimento del secondo ordine e chiediamoci cosa si può fare per riscaldare una stanza ai 22°C. Sembra si debba utilizzare energia a più bassa temperatura come quella che forniscono gli impianti di cogenerazione⁹ o i pannelli solari piani. Facciamoci allora lo stesso conto di prima sostituendo al bruciatore a gasolio dei pannelli solari che lavorino, ad esempio, a 45°C ($T_3 = 318^\circ\text{K}$) e con un rendimento $r = 80\%$ (la parte mancante è dovuta a perdite di calore nelle tubazioni):

$$\epsilon = r \cdot \frac{1 - \frac{T_1}{T_2}}{1 - \frac{T_1}{T_3}} = 0,80 \cdot \frac{1 - \frac{280}{295}}{1 - \frac{280}{318}} = 0,34 = 34\%$$

Come si può vedere, quindi, con un uso appropriato della fonte energetica, il rendimento del secondo ordine sale enormemente. Ma noi abbiamo fatto solo un esempio; i fisici dell'APS ci forniscono dei dati più completi ed interessanti che sono riportati nella tabella a fianco a confronto con i rendimenti del secondo ordine di alcuni impianti solari.

Guardando la tabella, si può notare che i rendimenti del primo e secondo ordine, praticamente, coincidono per la produzione di energia elettrica e meccanica. Cosa vuol dire? Ambedue queste forme di energia sono estremamente pregiate; per la loro produzione

Sistemi convenzionali	r in %	E in %
Scaldabagno elettrico	75	1,5
Scaldabagno a gas	50	3
Riscaldamento centralizzato	75	15
Caldaia a gasolio per riscaldamento	60	6
Radiatore elettrico per riscaldamento	90	2,5
Frigorifero a compressore	90	4
Produzione di vapore di processo	85	30
Trasporto auto private	20	10
Produzione di energia elettrica	38	33
Produzione di energia meccanica	30 + 40	30 + 40
Sistemi solari		
Riscaldamento di ambienti	50	
Produzione di acqua calda	75	
Produzione di energia meccanica	75	
Produzione di vapore di processo	50	

(N.B.) - I valori dati sono spesso mediati poiché, come sappiamo, i rendimenti r e ϵ dipendono dalle differenze di temperatura tra le sorgenti calda e fredda)

ne occorre un'energia egualmente pregiata, quella contenuta nel calore ad alta temperatura. Come già accennato, per la produzione di calore a bassa temperatura, quello che serve per riscaldare ambienti o per avere acqua calda nello scaldabagno, è completamente errato l'uso di energia pregiata (alte temperature, energia elettrica, energia meccanica,...). L'energia (o il calore) a bassa temperatura è un qualcosa di scadente che si ottiene con gran facilità; per ottenere quindi calore a bassa temperatura occorre utilizzare fonti di calore che non superino i 120-130°C. Quando il salto tra la temperatura che ci occorre e quella che viene utilizzata è piccolo allora, possiamo star certi, abbiamo un rendimento del secondo ordine relativamente alto.

Si può poi osservare che, a volte, l'uso della fonte energetica appropriata può permettere l'aumento di un fattore 10 del valore del rendimento del secondo ordine. L'esempio numerico che abbiamo precedentemente visto è un esempio di quanto vado dicendo:

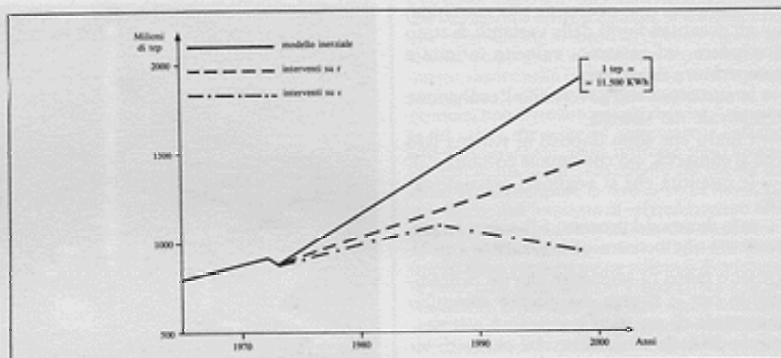
nel caso in cui si procedeva al riscaldamento di un ambiente mediante un sistema collegato ad una caldaia a gasolio si otteneva $\epsilon = 3,6\%$, nel caso in cui per lo stesso scopo si utilizzavano pannelli solari si otteneva $\epsilon = 34\%$. Che vuol dire ciò? Se pensiamo le cose in termini di energia scopriamo che la disponibilità energetica aumenta di circa 10 volte; se le pensiamo in termini di combustibile le cose diventano del tutto distinte: nel caso della caldaia c'è il consumo di una fonte energetica non rinnovabile, nel caso dei pannelli solari, per ottenere la prestazione in oggetto non dobbiamo consumare nulla che non si ricrei immediatamente. Ma, volendo anche escludere i pannelli solari, il riscaldamento domestico e dell'acqua si può certamente ottenere con il recupero del calore di scarto di svariati impianti industriali, centrali termoelettriche od altro. Questi impianti scaricano normalmente verso l'ambiente esterno notevoli quantità di energia sotto forma di acqua a «bassa temperatura» dell'ordine dei 25-40°C. È proprio ciò che serve per l'uso che ci proponiamo. Impianti di cogenerazione e teleriscaldamento⁹ possono utilmente servire allo scopo. Risolte tutte le compatibilità tecnologiche, resta da risolvere quelle economiche e politiche (con l'osservazione che vari esempi hanno già dimostrato l'economicità dell'investimento iniziale: Brescia, Reggio Emilia, Bologna,...). C'è ancora un'altra osservazione relativa, questa volta, al confronto tra il rendimento del primo ordine con quello del secondo ordine. Riferendoci ancora all'esempio numerico da noi fatto, si può vedere che i due rendimenti, nel caso in cui per riscaldare il nostro ambiente utilizzavamo la caldaia alimentata a gasolio, valevano rispettivamente $r = 60\%$, $\epsilon = 3,6\%$. Poiché il rendimento del primo ordine ha come referente C'è ancora un'altra osservazione relativa, questa volta, al confronto tra il rendimento del primo ordine con quello del secondo ordine. Riferendoci ancora all'esempio numerico da noi fatto, si può vedere che i due rendimenti, nel caso in cui per riscaldare il nostro ambiente utilizzavamo la caldaia alimentata a gasolio, valevano rispettivamente $r = 60\%$, $\epsilon = 3,6\%$. Poiché il rendimento del primo ordine ha come referente il primo principio della termodinamica, ci dà un'informazione distinta dal rendimento del secondo ordine, che ha come referente il secondo principio: r ci dice che il massimo risparmio teorico che possiamo realizzare è del 40%; ϵ ci dice che il massimo risparmio teorico che possiamo realizzare è del 96,4%. E, da tutto ciò che abbiamo detto, si dovrebbe essere capito che il rendimento del secondo

ordine prevede un intervento in più sugli impianti consumatori di energia: è l'impianto adeguato al fine che ci proponiamo? E non basta migliorare i rendimenti r delle macchine, occorre anche provvedere a sostituirle quando altre macchine raggiungono lo stesso scopo con minor impiego di energia.

Sì, qualcuno può osservare, va tutto bene, ma che incidenza complessiva ha il riscaldamento dell'acqua e degli ambienti nell'economia italiana? A prescindere dal fatto che qui si sono fatti solo degli esempi molto parziali e che, come mostrano i fisici dell'APS, l'applicazione del rendimento del secondo ordine ha un notevole impatto anche nel settore produttivo, industriale e dei trasporti, riferendoci al solo riscaldamento di acqua e di ambienti, occorre sapere che in Italia quasi un terzo dell'energia che viene consumata va in questi usi! Con un intervento su ϵ sarebbe possibile fornire al nostro paese grosse quantità di energia.¹⁰

Più in generale gli interventi su ϵ a livello della Comunità Europea sono stati oggetti di studio approfondito con proiezioni all'anno 2000.¹¹ Si sono ipotizzati tre modelli di crescita della domanda di energia primaria: il primo basato su un «modello inerziale», le cose andranno così come sono andate fino ad ora; il secondo con una politica di interventi su r ; il terzo con una politica di interventi su ϵ . Alla base di tre modelli c'erano ipotesi comuni: stesso incremento annuo di popolazione (0,8%), del numero di autovetture (3,6%), del prodotto nazionale lordo (4%). I risultati sono riportati sul grafico a fianco che, mi pare, parli da solo: con gli interventi su ϵ , nell'anno 2000 occorrerà circa un terzo (!) dell'energia che occorrerebbe marciando con il modello inerziale.

Il risveglio della termodinamica nel 1974 ha fatto seguire altri lavori a quello di cui ci siamo occupati e tutti con il fine di trarre il massimo utile da un dato combustibile. Di particolare interesse sono una serie di ricerche il cui resoconto si può trovare in un recente articolo di Andresen, Salamon e Gray su *Physics Today*. Gli autori, che fanno riferimento ad una estesa bibliografia, partono dalla considerazione che fino ad ora si sono calcolati i rendimenti (del I° e del II° ordine) delle varie macchine, confrontando queste ultime con una macchina ideale funzionante con processi reversibili. Questi processi si possono mentalmente realizzare pensando a trasformazioni termodinamiche che, tra l'altro, avvengono con estrema lentezza (meglio se in un tempo infinito). Secondo i nostri autori, non sembra utile confrontare processi reali, che non so-



no mai reversibili, con processi che dovrebbero avvenire in un tempo infinito. Che interesse ha, infatti, pensare ad una fabbrica che costruisca automobili con estrema lentezza? Si tratta quindi di trovare dei limiti più realistici al comportamento delle macchine reali che noi utilizziamo. Un possibile approccio è proprio quello di tener conto del tempo finito nel quale si realizza una data trasformazione termodinamica. Così facendo passiamo dal concetto di massima energia a quello di massima potenza. Per capire come sia possibile realizzare l'ottimizzazione (per ora solo teorica) di una data macchina, riferiamoci ad un esempio: il moto di un pistone in un motore funzionante con ciclo Otto a quattro tempi (motore a scoppio).

Per semplicità pensiamo che le perdite di calore verso l'ambiente esterno siano proporzionali all'area del cilindro esposta a questo ambiente; supponiamo inoltre che la macchina funzioni a ciclo costante consumando la stessa quantità di combustibile per ogni ciclo e che l'attrito si mantenga costante, allo stesso modo di tutti gli altri parametri interessati al fenomeno. Tutti sanno che in un motore a scoppio, tra le quattro fasi presenti (aspirazione, compressione, «scoppio», scarico), solo lo scoppio è una fase attiva. Per ottimizzare il moto di questo cilindro occorrerà, allora, riferirsi a questa sola fase. La principale causa del basso rendimento di un motore a scoppio è la grande perdita di calore che si ha in corrispondenza del momento più caldo dell'esplosione della miscela (al momento in cui scocca la scintilla della candela). Quando la miscela esplose, fa scorrere violentemente il pistone nel cilindro. Questa fase, anche se si realizza in un tempo breve, richiede pur sempre del tempo. E quanto maggiore è questo tempo, quanto più calore si disperde verso l'esterno. Occorre quindi pensare una macchina in cui, al mo-

mento dell'esplosione, il pistone acquisti la massima accelerazione possibile in modo che questa fase si realizzi nel minor tempo possibile. A conti fatti l'ottimizzazione del ciclo si ottiene con una accelerazione massima del pistone di $5 \cdot 10^4$ m/sec², equivalente a circa dieci volte l'accelerazione che si ha in un motore reale. Il rendimento r della macchina aumenterebbe così di una quantità compresa tra l'8 ed il 15%.

Lo scopo della termodinamica dei tempi finiti è proprio quello di realizzare (teoricamente) dei cicli ottimizzati fornendo una risposta alla domanda: come influisce su di un dato processo l'imposizione di limiti al tempo ed alla velocità nelle variabili (e quindi nel comportamento) del processo? Questa termodinamica si differenzia da quella, già nota, dei processi irreversibili che risponde all'altra domanda: quali sono le equazioni del moto delle variabili di stato termodinamiche di un dato sistema e come possiamo risolverle? Per sviluppare questa ultima ci si serve di funzioni che tentano sempre di fornire il massimo lavoro o calore compatibile con i principi della termodinamica. Per lo studio della prima si utilizzano funzioni che, in breve, si possono definire più realistiche non descrivendo più processi reversibili. Per altri versi la termodinamica dei tempi finiti si differenzia anche dall'ingegneria pratica: quest'ultima, infatti, si preoccupa di ottimizzare un modello di un particolare sistema attraverso l'ottimizzazione dei valori dei parametri chiave; la prima, invece, lavora sul miglior cammino temporale di una classe di sistemi, cercando quello che ottimizza il comportamento di un dato processo.

Vi sono svariate questioni che occorre tener presenti per realizzare ciò che abbiamo chiamato il miglior cammino temporale. Di volta in volta occorrerà specificare:

— quali sono le variabili che possono esse-

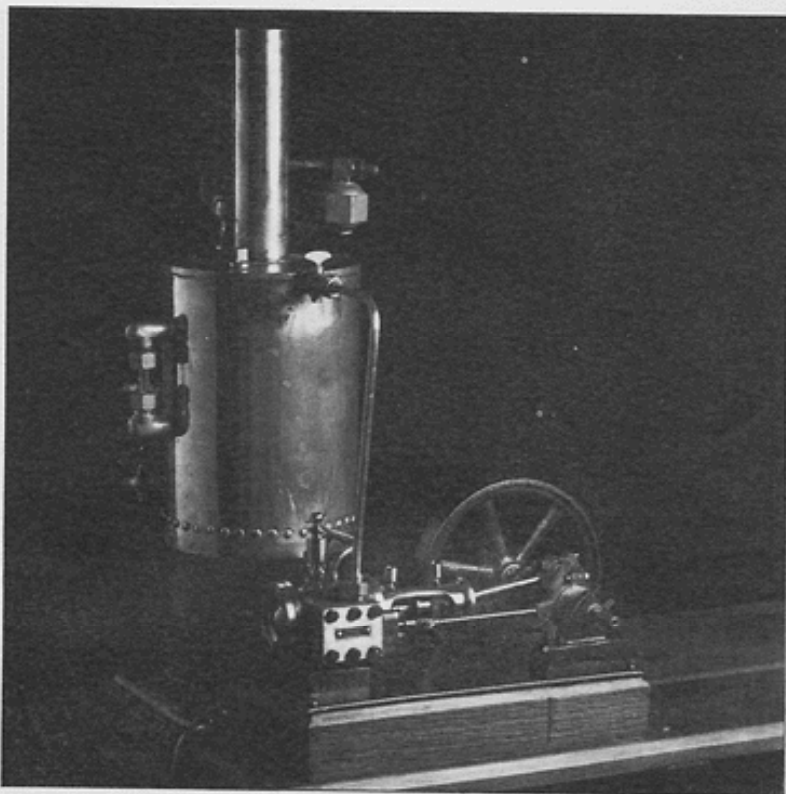
re manipolate dall'operatore alla macchina;

- gli eventuali limiti delle variabili di stato (escludere, ad esempio, velocità infinite e temperature negative);
- le equazioni che governano l'evoluzione temporale del sistema;
- i limiti che sono imposti al sistema (ciò che si conserva, ciò che rimane costante,...);
- le quantità che si vogliono massimizzare;
- se la durata del processo è fissata o fa parte di ciò che occorre ottimizzare.

Quanto detto fa intendere che un procedimento per la ricerca del miglior cammino temporale di un dato processo è estremamente difficile e laborioso dal punto di vista del calcolo (ci si serve dei principi variazionali là dove, nella termodinamica dei processi irreversibili, si fa uso di equazioni differenziali).

Come esempio di applicazione di questo procedimento possiamo dare i risultati a cui è giunto Morton Rubin nello studio dell'ottimizzazione del cammino temporale di una macchina che fornisca lavoro sfruttando la differenza di temperatura tra due sorgenti (problema di Carnot). Partiva dalle seguenti ipotesi: nessuna limitazione al tipo di trasformazioni termodinamiche che possono essere realizzate; limitazioni alle riserve di calore a differenti temperature, al trasferimento di calore ed alla velocità di cambiamento del volume disponibile. Ha trovato un ciclo costituito da due isoterme e da quattro trasformazioni cui corrisponde la massima potenza, che non sono però delle adiabatiche (ricordo che il ciclo reversibile di Carnot è costituito da due isoterme e due adiabatiche). Aumentando le limitazioni al rapporto di compressione, si ottiene una macchina che si avvicina ancora di più ad una macchina reale. Questa volta il numero di trasformazioni termodinamiche che descrive il ciclo diventa di otto.

Si può poi pensare a limitazioni che si avvicinino ulteriormente ad una macchina reale. Si può ad esempio tener conto del fatto che le sorgenti di calore non sono infinite. In un ordinario motore, infatti, il potere calorifico del carburante ha un fissato valore. Ebbene, così procedendo si può arrivare a costruire cicli teorici più realistici cui confrontare quelli reali. Questa è la strada che percorre la termodinamica dei tempi finiti. Anche qui, comunque, questi lavori teorici avranno una ricaduta sulla nostra vita energetica quotidiana, solo quando imprenditori e politici capiranno l'importanza del gran bene energia e, questa volta è il caso di dirlo, potenza.



Modello di macchina a vapore a cilindro orizzontale.

NOTE

¹ La macchina di Carnot è ideale per quanto segue: si lavora con un gas perfetto che non crea alcun problema alla macchina (questi gas non esistono in natura; quelli che più si avvicinano ad essi sono i gas nobili); si prescinde completamente dagli attriti che, sviluppando calore, modificherebbero i bilanci termici; in due delle fasi del ciclo che descrive la macchina di Carnot si ha a che fare con due trasformazioni isoterme, cosa che si può ottenere solo se il ciclo viene percorso a velocità quasi nulla; nelle altre due trasformazioni che costituiscono il ciclo si suppone di non avere scambi di calore con l'ambiente esterno, fatto non realizzabile nella pratica.

² In tutto l'articolo supporremo sempre di misurare sia il lavoro che il calore nella stessa unità di misura: il joule. Le temperature (T) saranno sempre date in gradi assoluti o Kelvin (°K). Vale l'identità: $T^{\circ}K = (t + 273)^{\circ}C$.

³ Ogni macchina termica (macchina a vapore, motore a scoppio, motore Diesel, frigorifero, pompa di calore, centrale termica...) funziona sempre mediante trasformazioni cicliche, trasformazioni che, dopo un dato percorso, riportano il sistema (la macchina termica) alle condizioni iniziali.

Nel caso in cui si abbia a che fare con trasformazioni aperte (non cicliche), come quando si comprimesse un dato fluido in un recipiente, la parte di lavoro o di calore mancante nel bilancio finale, risulterebbe accumulata sotto forma di energia interna dagli atomi o molecole costituenti il sistema.

⁴ In luogo di rendimento, a volte, si usa il termine efficienza.

⁵ Il rendimento così introdotto è ancora un concetto molto teorico. Nella pratica bisogna tener conto di molti altri fattori. Se, ad esempio, disponiamo di una macchina a vapore, dobbiamo considerare vari rendimenti e poi metterli insieme in

un rendimento complessivo. Il rendimento da noi definito nel testo è chiamato rendimento teorico r_t , esso mette in relazione il lavoro che si può ottenere dal ciclo teorico L_t con il calore utile Q_u , quello che si sviluppa nella caldaia (si osservi che il Q_u corrisponde al nostro Q_2):

$$r_t = \frac{L_t}{Q_u}$$

Poiché poi il calore di combustione di un combustibile Q_c è sempre più grande del calore sviluppato nel focolare della caldaia Q_u , si introduce il rendimento della caldaia r_c che è dato dal rapporto tra il calore che si produce nel focolare della caldaia e quello potenziale del combustibile:

$$r_c = \frac{Q_u}{Q_c}$$

Sulla macchina a vapore c'è poi uno strumento (indicatore di Watt) che permette di leggere direttamente il lavoro che la macchina sta facendo. Chiamando questo lavoro con l'espressione lavoro indicato L_i , si può introdurre il rendimento indicato r_i , dato dal rapporto tra il lavoro che l'indicatore segna ed il calore che si sviluppa nel focolare Q_u :

$$r_i = \frac{L_i}{Q_u}$$

Poiché il lavoro indicato è sempre minore del lavoro effettivo L_e fatto dalla macchina, occorre introdurre il rendimento meccanico r_m , dato dal rapporto tra il lavoro effettivamente fatto e quello letto sullo strumento della macchina:

$$r_m = \frac{L_e}{L_i}$$

Infine c'è il rendimento effettivo r_e (a volte chiamato rendimento totale o rendimento industriale), dato dal rapporto tra il lavoro effettivamente fatto dalla macchina L_e ed il calore che potenzialmente può sviluppare il combustibile Q_c :

$$r_e = \frac{L_e}{Q_c}$$

Si può facilmente vedere che il rendimento effettivo è dato dal prodotto del rendimento della caldaia, per il rendimento indicato, per il rendimento meccanico:

$$R_e = \frac{Q_u}{Q_c} \cdot \frac{L_i}{Q_u} \cdot \frac{L_e}{L_i} = \frac{L_e}{Q_c}$$

si può quindi scrivere:

$$r_e = r_c \cdot r_i \cdot r_m$$

e, più in generale, si può dire che il rendimento globale di un impianto è dato dal prodotto dei rendimenti complessivi dei singoli componenti. Se invece di macchine a vapore, disponiamo di macchine a combustione interna (motori a scoppio o Diesel) si possono solo definire i rendimenti teorico ed effettivo.

⁶ AIP Conference Proceedings - *Physics and the Energy Problem*, 1974 - American Institute of Physics, New York, 1974, N° 19.

AIP Conference Proceedings - *Efficient Use of*

energy - American Institute of Physics, New York, 1975, N° 25.

AA.VV. - *Efficient use of energy* - Physics Today, agosto 1975.

AA.VV. - *Physics in combustion research* - Physics Today, dicembre 1975.

⁷ Per il significato del concetto di 'entropia', vedi *Sapere* del novembre 1983.

⁸ Vi sono diversi tipi di pompa di calore: quella a cui ci riferiamo è una pompa di calore alimentata attraverso un motore diesel. È da notare che, mentre nelle tradizionali stufe elettriche si produce calore per effetto Joule (riscaldamento di una resistenza al passaggio di una corrente), una pompa di calore 'trasferisce' calore da un ambiente a bassa temperatura ad un altro, anch'esso a bassa temperatura. Nel far questo consuma del combustibile, cioè energia pregiata, ma ne consuma molto meno (a parità di riscaldamento prodotto). Se, ad esempio, una stufa tradizionale consuma 1 KWh di energia elettrica, ciò vuol dire che otteniamo l'intero KWh in termini di calore. Se utilizziamo invece 1 KWh di energia termica per alimentare una pompa di calore, otteniamo una quantità di calore pari a 2 + 4 volte quello che ci può essere fornito dall'impianto tradizionale di cui si diceva. Ciò vuol dire che, con una pompa di calore, l'energia di 1 KWh può trasportare un calore equivalente compreso tra i due ed i quattro KWh. Quanto qui detto è valido in media perché, bisogna osservare, più è bassa la temperatura dell'ambiente da cui si preleva calore, più è difficile per la pompa estrarre calore da esso. Il fatto poi che l'energia finale sia superiore di quella in ingresso, non deve stupire: è una mera conseguenza del fatto che, per questo tipo di macchina, il coefficiente di prestazione risulta maggiore di 1. Nessuna violazione del principio di conservazione dell'energia poiché, da una parte, viene utilizzato del calore già esistente, quello dell'ambiente esterno (occorre solo elevarlo un po' di temperatura), dall'altra, si utilizza tutto il calore di scarto del diesel. Per venire all'esempio trattato nel testo, si può fare un discorso molto semplice che serve ad illustrare l'utilità della pompa rispetto ad impianti tradizionali (l'esempio è fatto da F. Butera in *Quale energia per quale società* - Mazzotta): supponiamo di voler irrigare un terreno che si trova a 100 m di altezza sul livello del mare; disponiamo di un bacino d'acqua a 2000 m di quota e di un laghetto a 50 m di quota. Certo, l'acqua dal bacino a 2000 m ci arriva gratis mentre quella del laghetto dobbiamo pomparla. Ma l'energia dell'acqua in alta quota è preziosa, è molto grande, con essa si possono fare cose molto più importanti (produzione di energia elettrica o meccanica); conviene spendere un poco d'energia e pompare l'acqua dal laghetto che sta a quota 50 m. Ritornando poi a come ho introdotto il rendimento del secondo ordine, c'è da dire che, utilizzare l'acqua del bacino a 2000 m per irrigare il nostro campo, equivale a schiacciare le noci con il maglio.

⁹ Una centrale termoelettrica funziona schematicamente nel modo seguente: viene scaldata acqua in un caldaia mediante un bruciatore alimentato, nella gran parte dei casi, da combustibili fossili (nelle centrali nucleari il riscaldamento dell'acqua

è ottenuto mediante reazioni di fissione nucleare che liberano una enorme quantità di energia); l'acqua viene scaldata in modo da ottenere vapore ad elevata temperatura e pressione; l'espansione di questo vapore nella turbina origina energia meccanica che, mediante accoppiamento con un generatore, può diventare energia elettrica. Una parte del calore che serve ad alimentare la caldaia, come già sappiamo, viene scaricato verso l'esterno (dell'acqua di raffreddamento che circola intorno al condensatore lo riversa verso fiumi, laghi, mari); dall'impianto di raffreddamento esce acqua calda ad una temperatura che oscilla tra i 25 ed i 40°C. La temperatura di quest'acqua è troppo bassa per poter essere utilizzata direttamente (andrebbe bene solo per l'agricoltura e la piscicoltura). È possibile però intervenire nella centrale, progettandola (o modificandola) in modo tale che l'acqua in uscita abbia una temperatura compresa tra gli 80 ed i 120°C, che è quella adatta per alimentare impianti di riscaldamento di edifici e per fornire acqua calda. Questo intervento nella centrale, che a questo punto genera simultaneamente elettricità e calore (cogenerazione), è naturalmente costoso. La temperatura dell'acqua calda, che sarebbe stata di scarico, può venire elevata con una maggiore spesa in combustibile ed in impianto: l'acqua calda così ottenuta può essere avviata al riscaldamento di una città mediante una rete di condotte a circuito chiuso (andata e ritorno) che si dipartono dalla centrale (telericaldamento).

I vantaggi del sistema cogenerazione-telericaldamento sono molteplici: si ottengono grossi risparmi energetici (il rendimento r di una centrale termoelettrica passa dal 35 + 40% che ha per sola produzione elettrica, all'80 + 85% con un impianto di cogenerazione) ed inquinamenti atmosferici molto minori (inquina e consuma meno un unico grande impianto che una miriade di piccoli impianti). Tanto per dare un ordine di grandezza, l'estensione a tutte le grandi città italiane del Centro-Nord di questo sistema comporterebbe un risparmio di circa 7 milioni di tonnellate equivalenti di petrolio (tep.)

¹⁰ Per ampliare quanto qui sostenuto, oltre alla bibliografia citata in nota 6, si può vedere: F. Butera (citato: G. B. Zorzoli - *Come conservare l'energia* - Le Scienze del marzo 1978; R. Renzetti - *L'energia* - Savelli, 1979).

¹¹ Si veda G. B. Zorzoli, citato.

¹² Riferendoci alla nota 5, ricordiamo che il rendimento globale di un impianto è dato dal prodotto dei rendimenti complessivi dei singoli componenti. Ebbene in questo caso dobbiamo considerare che è una macchina reale quella che scalda il nostro ambiente. Questa macchina avrà un coefficiente di prestazione globale pari a $r_g = Q_2/L_{eff}$. Ora, la nostra macchina può essere pensata come una pompa di calore di Carnot (lavorante tra le temperature T_3 e T_1) con un suo coefficiente di prestazione r_c , alimentata dalla caldaia con il suo rendimento r (che rende conto delle perdite di calore attraverso il camino e le tubature). Si avrà allora:

$$r_g = r \cdot r_c = Q_2/L_{eff} = r \cdot 1/(1-T_1/T_3) \cdot L_{eff}/Q_2 = (1-T_1/T_3)/r \cdot L_{eff} = Q_2(1-T_1/T_3)/r$$