

## CONSIDERAZIONI TERMODINAMICHE<sup>1,2</sup>

### *Alcune relazioni fisiche*

Con il degradarsi dell'energia, si ha produzione di entropia, la grandezza fisica introdotta da Clausius nel 1865, cosicché le due dizioni: «degradazione dell'energia» e «produzione di entropia» sono pressoché sinonimi.

Fra entropia e degradazione dell'energia intercorre una relazione molto semplice. Ma innanzitutto: come si definisce la degradazione dell'energia? Se in condizioni ideali (che non vogliamo qui definire, ma che vanno considerate irraggiungibili) una certa quantità di energia  $E$  possiede una exergia (cioè una possibilità di produrre lavoro),  $Ex$ , mentre in condizioni reali il lavoro prodotto è  $W$  (minore di  $Ex$ ), la degradazione dell'energia è misurata dalla perdita ( $Ex - W$ ) di lavoro disponibile e l'efficienza termodinamica  $\eta$  (detta anche «rendimento di secondo principio», perché la sua formulazione tiene conto di entrambi i principi della termodinamica) è data dalla frazione  $W/Ex = 1 - (Ex - W)/Ex$ .

Fra la degradazione dell'energia (o perdita di lavoro disponibile, o perdita di exergia) e la produzione di entropia  $S_{irr}$  ad essa associata esiste la relazione  $(Ex - W) = T_a S_{irr}$ . Il suffisso «irr», in  $S_{irr}$ , sta a ricordare che la degradazione dell'energia o la produzione di entropia sono dovute a *irreversibilità* presenti nel mondo reale; mentre, in un mondo di fate, i processi sarebbero reversibili,  $S_{irr}$  sarebbe uguale a zero e  $W = Ex$ . Quanto a  $T_a$  essa è la temperatura dell'ambiente, fissata convenzionalmente pari a  $25\text{ °C} = 298\text{ K}$ , mentre la pressione (altra grandezza che caratterizza l'ambiente) è supposta pari a quella atmosferica.

Introdotte così le grandezze energia  $E$ , exergia  $Ex$ , entropia  $S$  e lavoro prodotto  $W$ , si può dimostrare che fra di loro esiste la seguente relazione:  $W = Ex - T_a S_{irr} = (E - E_a) - T_a (S - S_a) - T_a S_{irr}$ .

Già si è detto il significato di  $T_a$ . Quanto a  $E_a$  e  $S_a$ , esse sono l'energia e l'entropia della o delle sostanze considerate a temperatura e pressione ambiente.

Il lavoro massimo producibile quando non sia presente alcuna degradazione, cioè l'exergia  $Ex$ , è dunque uguale a  $(E - E_a) - T_a (S - S_a)$ . Non tutta l'energia  $(E - E_a)$  è perciò trasformabile in lavoro. La parte non convertibile,  $T_a (S - S_a)$ , è chiamata *anergia*, termine che si presta tuttavia a obiezioni non puramente formali. Se applichiamo l'espressione dell'exergia a una massa unitaria - un chilogrammo - di combustibile (fossile o nucleare), con cui sia alimentato un impianto - un sistema che in gergo scientifico si dice *aperto*, perché massa vi entra e massa ne esce sotto forma di ceneri e gas di combustione - il termine  $(E - E_a)$  altro non è che il potere calorifico  $P_c$  del combustibile stesso. Anche in condizioni ideali, dunque, non tutto il potere calorifico può essere trasformato in lavoro. Ad esempio, un chilogrammo (non un litro) di benzina ha un potere calorifico di circa 47 milioni di joule ( $47 \times 10^6\text{ J/kg} = 11200\text{ kcal/kg}$ ). Ma solo il 94% può essere teoricamente convertito in lavoro, perché, inevitabilmente, una reazione esotermica, cioè spontanea, genera entropia nella scomparsa dei reagenti e nell'apparizione dei prodotti di reazione. Il resto è anergia, cioè energia termica non trasformabile in lavoro per ragioni di principio e non per imperfezioni di macchinario.

### *Attendibilità del lavoro producibile come misura del pregio dell'energia*

E' ammissibile valutare il pregio dell'energia solo attraverso la sua capacità di produrre lavoro? In fondo, nelle attività umane, non sempre è necessario sollevare pesi o muovere veicoli. Molti bisogni sono soddisfatti con l'energia termica, cioè con il calore. Per riscaldare e rendere abitabile un ambiente chiuso in inverno, quando la temperatura esterna (nei nostri climi) è prossima allo zero centigrado, ciò di cui abbiamo bisogno è innalzare la temperatura dell'aria interna a  $20\div 22\text{ °C}$ , temperatura alla quale ci sentiamo perfettamente a nostro agio. Eppure, se calcoliamo l'exergia (cioè la capacità di produrre lavoro) di quest'aria riscaldata a  $20\div 22\text{ °C}$ , vediamo che essa è risibile.

<sup>1</sup> Mario Silvestri, *Il futuro dell'energia*, Bollati Boringhieri, Torino (1988).

<sup>2</sup> Y.A. Çengel, M.A. Boles, *Thermodynamics - An Engineering Approach*, WCB/McGraw-Hill, 3rd ed. (1998).

Ma allora perché etichettare questa energia con una patente di quasi inutilità, mentre è proprio ciò che ci serve?

Il fatto è che, disponendo di una sorgente di lavoro, con essa possiamo procurarci il calore di cui abbiamo bisogno, alla temperatura desiderata, con estrema facilità concettuale.

Carnot raggiunse le seguenti conclusioni: dati due serbatoi, dei quali l'uno a temperatura  $T_2$  e l'altro a temperatura  $T_1$ , (più bassa di  $T_2$ ), si può produrre lavoro utilizzando un fluido che compie una trasformazione ciclica (cioè tale che alla fine il fluido ritorna allo stato iniziale, in modo da rimanere immutato), ma solo la frazione  $(T_2 - T_1)/T_2$  del calore estratto a più alta temperatura  $T_2$  può essere trasformata idealmente in lavoro (una frazione, quindi, maggiore se  $T_2$  è maggiore e  $T_1$  è minore). Il resto deve essere riversato a temperatura  $T_1$ , cioè alla stessa temperatura del serbatoio freddo, entro il serbatoio freddo. Se il serbatoio freddo coincide con l'ambiente, in esso l'energia ceduta a temperatura  $T_1$  perde la sua identità.

Quindi, l'energia termica è fortemente penalizzata, dal punto di vista del lavoro da essa ottenibile, dal diminuire della sua temperatura. Se una quantità di calore  $Q$  a temperatura  $T$  deve essere trasformata in lavoro, ammessa la necessaria esistenza di un ambiente (o serbatoio) a temperatura  $T_a$  (minore di  $T$ ), ciò può avvenire al massimo entro i limiti concessi dalla sua energia (pari a  $T_a/T$ ). Se  $T_a = 300\text{ K}$  ( $= 27\text{ °C}$ ) e  $T = 500\text{ K}$  ( $= 227\text{ °C}$ ),  $3/5$  di  $Q$  non sono trasformabili in lavoro. A ridurre ulteriormente l'ammontare di questo lavoro contribuiscono poi le irreversibilità, che sono fatalmente presenti nel processo reale e che lo allontanano dalle condizioni di idealità.

Il fluido può subire la trasformazione ciclica in senso opposto (ciclo di Carnot inverso, come si dice in gergo termotecnico): data la disponibilità di lavoro, con esso si può trasferire del calore dalla sorgente a temperatura «fredda»  $T_1$  alla sorgente alla temperatura «calda»  $T_2$ , in condizioni ideali nella misura  $T_2/(T_2 - T_1)$  volte il lavoro speso (in misura, quindi, maggiore, se  $T_2$  è minore e  $T_1$  è maggiore). La macchina che esegue questa operazione è detta *pompa di calore*. Se dunque disponiamo di calore a  $0\text{ °C}$  ( $= 273\text{ K}$ ) e lo vogliamo innalzare a temperatura di  $20\text{ °C} = 293\text{ K}$ , idealmente ci basta disporre anche di una certa quantità di lavoro, perché con essa siamo in grado di trasferire a  $20\text{ °C}$  una quantità di calore 14,65 volte maggiore:  $293/(293 - 273) = 293/20 = 14,65$ . Oltre al lavoro inizialmente disponibile, abbiamo dovuto aspirare dall'ambiente a  $0\text{ °C}$  una quantità di calore pari a  $14,65 - 1 = 13,65$  volte il lavoro inizialmente disponibile, cioè tutta l'energia trasferita *meno* quella inizialmente disponibile come lavoro. A questo punto, volendolo, potremmo far percorrere a tale energia termica a  $20\text{ °C}$  un ciclo di Carnot «diretto», ritrovandoci alla fine con il lavoro di cui eravamo inizialmente in possesso, senza avere alterato l'ambiente esterno a  $0\text{ °C}$ . Tutto si è dunque svolto in modo reversibile: dal lavoro abbiamo ottenuto calore; da questo calore - volendolo - possiamo riottenere la iniziale quantità di lavoro.

Ma la produzione termodinamica del calore (mediante la pompa di calore) è un'operazione tecnologicamente complessa. Quanto più facile e semplice risulta, ad esempio con del buon metano, riscaldare dell'acqua da far circolare nei soliti radiatori a  $60\div 70\text{ °C}$ ! Con un metro cubo di metano (pari a circa  $0,7\text{ kg}$ ), capace di sviluppare per combustione con aria  $8200\text{ kcal} = 34\text{ milioni di joule}$ , si possono riscaldare, da  $0^\circ$  a  $20\text{ °C}$  circa  $1600\text{ m}^3$  d'aria (supponendo che non vi siano fughe di calore). Ma, mediante la stessa quantità di gas naturale, potremmo riscaldare idealmente, per via termodinamica, non  $1600$  ma addirittura  $22\ 000\text{ m}^3$  d'aria da  $0$  a  $20\text{ °C}$ . Infatti, se  $P_c$  ( $= 34\text{ milioni di joule}$ ) è il suo potere calorifico, l'exergia (cioè il lavoro disponibile) che possiamo estrarre da  $1\text{ m}^3$  è pari a  $34 \times 10^6\text{ joule} - T_a(S - S_a)$ , ovvero, calcolato opportunamente il termine  $T_a(S - S_a)$ ,  $= 0,95 \times 34 \times 10^6\text{ J} = \text{circa } 32 \times 10^6\text{ J}$ . Se dunque bruciando puramente e semplicemente  $1\text{ m}^3$  di metano si possono riscaldare  $1600\text{ m}^3$  d'aria da  $0^\circ$  a  $20\text{ °C}$ , bruciandolo in macchine termodinamiche ideali la quantità di aria che possiamo riscaldare è pari a  $1600 \times 0,95 \times 14,65 = 22\ 000\text{ m}^3$  (prelevando, sottoforma di calore, una quota infima dell'energia presente in quantità incommensurabile nell'ambiente, che, quindi, non viene modificato dall'operazione).

In altri termini, attraverso il lavoro si riesce ad ottenere alla temperatura desiderata una quantità di energia termica maggiore, non perché si trasforma in termica una quantità di energia maggiore del lavoro speso (sarebbe contrario al principio di conservazione dell'energia), ma perché con il

lavoro si porta a questa temperatura anche una parte dell'energia solare che è immagazzinata dall'ambiente ad una temperatura più bassa di quella desiderata. Quindi, anche da un punto di vista termico, il lavoro è un'energia di qualità superiore rispetto all'energia termica.

### *Classificazione dell'energia ed efficienza di trasformazione da una forma di energia ad un'altra*

L'energia viene classificata in base alla sua natura: energia meccanica (cinetica, potenziale, elastica, ecc.), energia termica (calore), energia elettrica, energia radiante, energia luminosa coerente (laser), energia chimica, energia nucleare e così via.

Alcune di queste forme di energia possono essere convertite quasi totalmente in lavoro, cioè sono accompagnate da una minuscola produzione di entropia (l'exergia coincide cioè con l'energia). Ad esempio è nulla l'anergia tanto dell'energia meccanica che di quella elettrica. La conversione di una forma di energia nell'altra è perciò quasi completa. Il «quasi» è di rigore, poiché la conversione non sarà mai perfetta, benché ci si possa avvicinare a volontà. Ad esempio un moderno alternatore di grandi dimensioni (dell'ordine di 1 milione di chilovoltampere - kVA -, che si trasformano automaticamente in chilowatt - kW -, se il carico è puramente resistivo) ha un rendimento di conversione dell'energia meccanica in energia elettrica intorno al 98,8%: tale rendimento può essere inteso come efficienza termodinamica della macchina. L'1,2% che va perduto (per attrito nei cuscinetti, per riscaldamento del rame e del ferro, indotto dal passaggio della corrente elettrica, per perdite di ventilazione, per l'alimentazione della dinamo di eccitazione ecc.) si trasforma in calore, disperso nell'ambiente con fuga della relativa energia e distruzione della corrispondente exergia.

La messa a punto di materiali elettrici superconduttori, che presentino resistenza elettrica rigorosamente nulla a temperatura di poco superiore a quella dell'azoto bollente (- 196 °C), farebbe salire il rendimento della macchina al 99,5%, riducendone inoltre il peso a metà. In tal caso il modesto aumento dell'efficienza termodinamica di processo sarebbe accompagnato da un vistoso aumento anche dell'efficienza termodinamica di impianto, con una sostanziosa riduzione delle perdite totali (di processo e di impianto). Se questo avvenisse, sarebbe l'esempio di come una scoperta scientifica possa sconvolgere le previsioni basate sui miglioramenti graduali delle tecnologie conosciute.

L'energia chimica, nella maggior parte dei casi (cioè nei casi in cui sia presente una certa quantità di anergia), non può essere trasformata totalmente in lavoro, come già si è visto. Una parte va ceduta obbligatoriamente all'ambiente, perché lo impongono le leggi fisiche, che non possono essere aggirate con il perfezionamento dei meccanismi. Quando poi, prima di essere trasformata in energia meccanica e/o elettrica, l'energia chimica è convertita in energia termica, la penalizzazione imposta dal processo di combustione risulta piuttosto elevata. Anche in tal caso sarebbe tuttavia possibile ridurre la produzione di entropia, utilizzando fiamme «quasi reversibili». Sono così chiamate quelle fiamme nelle quali, per un complesso gioco di equilibri chimici fra le specie reagenti e presenti in camera di combustione (comburente, combustibile e prodotti di combustione: ad esempio CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, cioè metano, ossigeno, anidride carbonica, vapor d'acqua) si perviene a una temperatura così elevata, che l'efficienza raggiungibile utilizzando tale temperatura come sorgente calda sfiora il 100% dell'exergia (non del potere calorifico!) del combustibile. Ma la fiamma reversibile cozza contro enormi difficoltà tecnologiche, legate al decadimento pauroso delle proprietà di tutti i materiali noti, volendo operare ad altissime temperature.

Per mostrare quanto arduo sia il miglioramento delle proprietà tecnologiche dei materiali ad alta temperatura e quanto si sia lontani dall'intravedere un avvicinamento alla temperatura di fiamma di una fiamma reversibile, ricorderò che, nel caso di centrali termoelettriche a vapore, non si riesce a superare i 570 - 580 °C per la temperatura di ammissione del vapore in turbina. I tentativi per portarla a 620 °C - con un discreto aumento dell'efficienza termodinamica - fallirono, per l'instaurarsi di una accelerata corrosione delle palettature tanto all'ingresso del vapore surriscaldato vergine, quanto all'ingresso di quello risurriscaldato. Eppure un innalzamento di temperatura apparentemente così modesto avrebbe aumentato dell'1 % la potenza della turbina.

Nel caso di una turbina a gas, la miscela gassosa con cui essa è alimentata (miscela costituita dai prodotti della combustione,  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ , nonché da molto azoto e da ossigeno in eccesso) è assai meno aggressiva del vapor d'acqua puro. La temperatura d'ingresso dei gas in turbina può quindi salire a più di  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ . Ma la fase di compressione del ciclo termodinamico deve avvenire sul fluido di lavoro che è in forma gassosa, con un notevole dispendio di potenza, che invece è trascurabile nei cicli a vapore dove la compressione del fluido avviene in fase liquida. Orbene, nelle turbine a gas l'elevata potenza di compressione annulla il beneficio della più alta temperatura di ingresso dei gas in turbina<sup>3</sup>. Anche questa temperatura, comunque, è molto inferiore a quella che sarebbe praticamente raggiungibile in camera di combustione (circa  $2000\text{ }^\circ\text{C}$ ); ma passando da  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  a  $2000\text{ }^\circ\text{C}$  le proprietà meccaniche dei materiali con cui sono fatte le prime corone di palette di turbina scadrebbero a livelli inaccettabili.

Quando insomma è affidato a un miglioramento delle qualità e delle proprietà dei materiali, il progresso bisogna attenderselo lento e graduale.

Attualmente le centrali elettriche a più alto rendimento (o meglio a più alta efficienza termodinamica), alimentate con combustibili fossili, sono quelle organizzate secondo il cosiddetto *schema combinato*. Questo consiste nel bruciare il combustibile con aria in pressione e nell'immettere i prodotti della combustione, compressi e caldi (alla massima temperatura sopportabile dalle prime palettature della turbina), in una turbina a gas. In essa, producendo lavoro, i gas si decomprimono fino a pressione atmosferica e si raffreddano, ma la loro temperatura in uscita dalla turbina a gas è ancora elevata. In uno scambiatore di calore questi gas, ancora caldi, scaldano acqua e producono vapore d'acqua pressurizzato dalla sua elevata tensione di vapore, che viene immesso in una turbina a vapore, dalla quale esce vapore freddo a pressione molto bassa (1/5 di quella atmosferica), recuperato come liquido da riutilizzare in un condensatore tenuto sotto vuoto refrigerato direttamente dall'acqua del mare o del fiume, o, indirettamente, dall'aria convogliata in torri di raffreddamento. In tali centrali si raggiungono così, pur nelle condizioni attuali, rendimenti molto elevati, del 50-60%, perché si riesce a sfruttare al massimo il salto tra la temperatura di fiamma e la temperatura dell'ambiente. Le centrali a ciclo combinato sono in continuo aumento, sostituendo via via le vecchie centrali termiche, che generalmente vanno in disuso dopo circa 30 anni di servizio.

Quindi, nella produzione di energia elettrica attraverso l'energia termica, una elevata frazione (maggiore del 40%) di quest'ultima viene comunque buttata via alla temperatura ambiente. Si può in parte ovviare a questo problema con la *cogenerazione*, prelevando cioè questa energia termica degradata ad una temperatura più alta di quella ambiente (per esempio  $90^\circ\text{C}$ , se si vuole *teleriscaldare* un quartiere cittadino), per renderla utilizzabile per altre applicazioni industriali o civili. Il rendimento elettrico diverrebbe in questo caso inferiore perché diminuirebbe la differenza di temperatura tra sorgente calda ( $T_2$ ) e pozzo freddo ( $T_1$ ), ma sarebbe accompagnato da un rendimento termico, con una utilizzazione molto più elevata dell'iniziale energia termica.

Per scopi di teleriscaldamento, la combinazione termodinamica ottimale si può allora ottenere accoppiando cogenerazione e pompe di calore. Queste assorbirebbero la potenza elettrica prodotta per utilizzare l'energia termica dell'ambiente, cercando, magari sotto terra, nelle acque di falda, quella a temperatura più elevata per aumentare il rendimento delle pompe. In questo caso, il rendimento termico passerebbe da 0.8-0.9 (quello di una ottima caldaia convenzionale) a 1.6-1.7.

---

<sup>3</sup> In generale, il miglior fluido motore in un ciclo termodinamico è quello che subisce un processo di evaporazione e uno di condensazione (per esempio, acqua in un impianto a vapore per la generazione di energia elettrica, speciali fluidi refrigeranti sintetici nei frigoriferi e nelle pompe di calore), per due principali motivi:

1. il processo di evaporazione porta ad una compressione spontanea del fluido in fase aeriforme, così come la condensazione porta ad una sua depressurizzazione, perché il fluido tende a passare rispettivamente da un piccolo ad un grande volume specifico e viceversa, per cui, per cercare di rimanere contenuto nel volume assegnato, rispettivamente si comprime e si espande
2. gli scambi di calore del fluido con la sorgente calda e con quella fredda avvengono in condizioni del fluido pressoché isoterme, riducendo così le irreversibilità del processo di scambio, perché il calore viene assorbito e ceduto rispettivamente durante l'evaporazione e la condensazione, sotto forma di calore latente

La reazione fra combustibile e comburente potrebbe avvenire evitando il passaggio attraverso la combustione. Con opportuni processi elettrochimici la reazione di «combustione» (che combustione non è) potrebbe avvenire in condizioni isothermobariche (al limite: a temperatura ambiente e a pressione atmosferica), convogliando, attraverso fili conduttori connessi ad un carico, l'altrimenti incontrollato irreversibile flusso di elettroni scambiati fra reagenti. Si otterrebbe così la trasformazione diretta di energia chimica in energia elettrica (il fenomeno fu scoperto addirittura nel 1839). Al venir meno delle penalizzazioni legate alla combustione e, negli impianti a vapore, ai due trasferimenti di calore che si inseriscono prima dell'ingresso del vapore nella turbina e dopo l'uscita del vapore da questa, si aggiungerebbe la cancellazione delle inevitabili irreversibilità, legate all'impiego di macchine rotanti. In tali generatori chimico-elettrici (detti *pile*, o *celle*, o *combustibile*, *fuel cell* in inglese) si sostituiscono però irreversibilità tipiche del processo elettrochimico (fenomeni di polarizzazione anodica e catodica), che non hanno finora permesso di superare, in macchine sperimentali che per loro natura sono totalmente statiche, efficienza termodinamiche del 50%. Le prospettive prevedono tuttavia efficienza comprese fra il 60 e il 70%.

Ma la classificazione dell'energia può venire su altre basi: per esempio in base al suo reperimento in natura e alle forme in cui si presenta. In natura l'energia elettrica è disponibile sotto forma di sporadiche anche se violente fulminazioni; un fulmine libera mediamente 1000 kWh, ma non si lascia immagazzinare. Quello di cui l'umanità ha bisogno non è genericamente l'energia, bensì «fonti di energia», suscettibili di essere trasformate in energia, nella forma in cui l'uomo ne ha bisogno, quando ne ha bisogno, per i suoi usi finali. Tali fonti di energia sono anche dette, frequentemente, «energie primarie» o, al singolare, «energia primaria». E l'energia primaria viene trasformata in «energie secondarie» (di cui quella elettrica è l'esempio più comune, ma si comincia a parlare anche di idrogeno). Il calore stesso può essere energia primaria (sotto forma di energia geotermica) o energia secondaria (come la fiamma del gas di cucina, impiegata per usi alimentari).

### *L'efficienza termodinamica*

Si è visto che la capacità di produrre lavoro (cioè il lavoro disponibile o exergia) è una misura sicura per etichettare la qualità dell'energia. Che il lavoro sia effettivamente prodotto o che esso rappresenti solo un artificio convenuto, per giudicare la bontà della nostra merce (l'energia), non ha importanza. E poiché, nell'esempio fatto, contro la possibilità teorica di riscaldare 22 000 m<sup>3</sup> da 0 a 20 °C per via termodinamica, noi generalmente ne riscaldiamo solo 1600 per via termica, l'efficienza termodinamica dell'utilizzazione del gas naturale in tal caso è un miserabile  $1600/22\ 000 = 7\%$ .

Tuttavia, il caso limite di una efficienza termodinamica pari al 100% richiederebbe condizioni che in pratica sono irraggiungibili e che tali resteranno nel futuro dei secoli.

La condizione di operare in regime di reversibilità sopra ricordato impone che tutte le operazioni siano condotte a velocità infinitamente piccola, talché non si facciano sentire attriti, turbolenze, vortici. Richiede inoltre che gli ipotetici radiatori, per erogare un tepore a 20 °C pur essendo essi stessi a 20 °C, abbiano superfici infinitamente estese, affinché da essi il calore sia ceduto all'ambiente da riscaldare con una sovratemperatura infinitamente piccola. La reversibilità richiede insomma, affinché si possa generare una potenza finita, un impianto infinitamente esteso, sia che si tratti di calore da trasformare in lavoro o viceversa. Ma un impianto infinitamente grande richiede, per essere costruito, una quantità infinita di capitali, di mano d'opera, di materiali e, in particolare, di energia. Si perviene allora al paradosso che far funzionare reversibilmente un impianto, anziché offrire la massima efficienza termodinamica, conduce a un'efficienza termodinamica negativa. Perché un impianto funzioni, le irreversibilità oltre che inevitabili sono dunque necessarie. Avviene così che, con la generazione termodinamica di calore, si riscaldi in pratica 1/3, ma più spesso 1/5 o ancor meno, di ciò che si potrebbe teoricamente riscaldare (pur sempre 7000 m<sup>3</sup> anziché 1600).

Ripetendo il concetto con altre parole, possiamo dividere l'energia indispensabile per ottenere un determinato risultato o un determinato prodotto in due porzioni: l'energia di processo e l'energia di impianto. La prima è minima quando il processo si svolge in modo ideale, cioè reversibile; via via

che cresce l'irreversibilità, l'energia di processo, necessaria per acquisire il risultato voluto, aumenta con l'aumentare della dissipazione, cioè con l'aumentare della velocità del processo stesso. Viceversa l'energia di impianto, cioè quella che è stata richiesta per costruire l'impianto in cui il processo avviene e che in esso è «congelata», è infinitamente grande, quando il processo si svolge a velocità infinitamente piccola. A mano a mano che questa cresce, l'impianto rimpicciolisce e con esso diminuisce l'energia in esso congelata. **L'ottimo energetico si raggiunge allora quando la somma delle due componenti: energia di processo + energia di impianto (= energia necessaria per raggiungere il risultato) è minima.** Nella risoluzione di questa equazione, cioè nel raggiungimento di questo minimo, si concretizza quell'operazione che a volte viene confusa con il risparmio energetico mentre più correttamente si può chiamare razionalizzazione nell'impiego e nell'uso dell'energia. Le parole «risparmio energetico» sono in una certa misura contraddittorie con il primo postulato della termodinamica, secondo il quale l'energia si conserva per definizione e quindi non ci sarebbe da fare alcuno sforzo per conservarla. Lo sforzo da fare invece esiste, e consiste nell'evitare che essa sfugga dal luogo dove è immagazzinata (risorsa energetica) o dove la si vuole confinare, e, soprattutto, nell'evitare che si degradi, cioè che diminuisca la sua capacità di produrre lavoro.

Quanto spesso si dice è approssimativo, frutto delle tacite convenzioni che abitualmente impieghiamo, senza prima definirle, nel linguaggio colloquiale. Se ci riferiamo al riscaldamento di un ambiente abitato (un appartamento, per fare un esempio), poco ci importa che l'energia in complesso né si crei né si distrugga e che quindi resti costante. Ci interessa, invece, che quella somministrata dai radiatori o dai pannelli radianti all'ambiente abitato si disperda verso l'ambiente esterno nella minor misura possibile, compatibilmente con la struttura dell'edificio. L'ambiente esterno si contrappone perciò all'ambiente interno. Da questo fluisce verso l'esterno energia sotto forma di calore, in modo continuo, e se ne deve provvedere la somministrazione (tramite i comuni termosifoni o i pannelli radianti) per via puramente termica (con bassa efficienza termodinamica) o per via termodinamica (con efficienza molto maggiore).

### *Bilancio energetico ed exergetico di un impianto industriale*

Prendendo in esame un impianto più complesso, ad esempio una centrale per la produzione di energia elettrica a partire da olio combustibile, ci troviamo di fronte a un'operazione formalmente molto più complicata, anche se concettualmente non diversa.

Possiamo schematizzarla per passi successivi che muovono lungo due filoni paralleli: quello dell'energia e quello dell'exergia, cioè del lavoro con essa producibile. Il primo filone è riferito a una grandezza - l'energia - che nel suo insieme si conserva, ma che può sfuggire diluendosi nell'ambiente esterno; l'altro è riferito all'exergia, che non solo può sfuggire ma non si conserva, perché a contatto con l'ambiente esterno si distrugge, anziché diluirsi.

Come si vede dalla tabella seguente, l'efficienza energetica, che qui interpretiamo come rapporto fra l'energia uscente dalla centrale sotto forma di lavoro elettrico e il potere calorifico del combustibile (41%) è poco diversa dall'efficienza termodinamica (43,5%) o efficienza exergetica (quest'ultima è addirittura maggiore della prima). Tuttavia la coincidenza è puramente casuale, mentre le due efficienze sono concettualmente diversissime, come si è visto con l'esempio dell'impianto di riscaldamento. In ordine di importanza le massime perdite exergetiche sono localizzate nella caldaia, dove pur sono minime le perdite energetiche, a causa del fenomeno della combustione, che trasforma l'energia chimica nel meno ordinato calore. Le fughe energetiche sono invece massime nel condensatore (40%), mentre qui è risibile la distruzione di exergia (3%): segno che l'energia scaricata nel condensatore ha valore pressoché nullo (perché è trascurabile la possibilità di produrre con essa lavoro). L'energia del combustibile (cioè il suo potere calorifico) che non si ritrova sotto forma di lavoro in uscita è stata *dispersa* lungo la strada verso l'esterno, mentre l'exergia che non si ritrova alla fine è andata *distrutta*.

All'inizio del secolo XVIII, con i combustibili allora disponibili, l'efficienza era invece dello 0.5% (producendo inoltre energia meccanica, e non già energia elettrica, che non era stata ancora

### Tabella

Efficienza energetica ed efficienza exergetica nella produzione di energia elettrica.  
Caso di una moderna centrale alimentata con olio combustibile.

Energia	Exergia
Energia sviluppabile dalla combustione = = Potere calorifico del combustibile	Exergia iniziale: lavoro che sarebbe ottenuto se la combustione fosse ideale, cioè reversibile ed isoterma, come in una pila a combustibile ideale $\approx 94\%$ del potere calorifico. Il 6% di anergia è dovuto al fatto che scompaiono i reagenti ed appaiono i prodotti di reazione
Ingresso del combustibile e del comburente in camera di combustione con sviluppo di calore ad alta temperatura (fiamma a 1500 °C)	
Dispersione di calore dalla camera di combustione Dispersione di calore con l'emissione di fumi a 120 °C Fuoriuscita di energia dal condensatore	Distruzione di exergia connessa col fenomeno della combustione, cioè col passaggio da energia chimica a calore (a 1500 °C) Distruzione di exergia trasferendo l'energia dalla temperatura di fiamma (1500 °C) a quella del vapor d'acqua immesso in turbina (570 °C, 250 atmosfere) Distruzione di exergia per dispersione del calore Distruzione di exergia con l'emissione dei fumi Perdita di exergia nella turbina Distruzione di exergia connessa con la fuoriuscita di energia dal condensatore
47% Exergia (ed energia) disponibile sull'asse della turbina	
Fuga di energia nei servizi	Perdita di exergia nei servizi
43% Exergia (ed energia) disponibile sull'asse della turbina al netto dei servizi	
Fughe di energia nel macchinario elettrico	Perdite di exergia nell'alternatore e nel trasformatore
41% Exergia (ed energia) in partenza lungo la linea di alta tensione	
<b>Totale dispersione energetica: 59%</b> <b>Rendimento energetico (o termico o di I principio): 41%</b>	<b>Totale distruzione exergetica: 53%</b> <b>Rendimento exergetico (o efficienza termodinamica o rendimento di II principio): <math>41/94 = 43.5\%</math></b>

scoperta). Se dunque in meno di tre secoli l'efficienza si è centuplicata (cicli combinati), come mai risulta oggi così difficile salire, per esempio, dal 50% al 70% o all'80%, cioè di una volta e mezzo?

#### Exergia di processo ed exergia di impianto

Qui si è parlato solo di energia o exergia di «processo», trascurando l'energia o l'exergia di «impianto». Qual è l'influenza di quest'ultima? Se oggi si raddoppiasse la dimensione di un moderno impianto termoelettrico e quindi il suo costo energetico (cioè l'exergia di impianto), è probabile che l'efficienza termodinamica salirebbe dal 50 al 55%. Orbene valutazioni attendibili fanno ascendere al 10% il costo exergetico dell'impianto originale rispetto all'exergia da questo prodotta in tutto l'arco della sua vita. Ciò significa che dell'energia elettrica prodotta (che è pura exergia), il 10% va concettualmente e finanziariamente dirottato, per costruire un impianto che sia in grado di sostituire quello operante, quando la sua vita tecnica (25 o 30 anni) giunge alla fine. In altre parole, questo ci dice che l'efficienza termodinamica *utile* (tenendo conto cioè dell'exergia di processo e di quella di impianto) in realtà non è pari al 50% ma al 45%. Con un impianto di costo exergetico doppio (che cioè all'exergia prodotta sottrae il 20% - anziché il 10% - per costruire il suo successore) l'efficienza utile scende al 55% - (20% del 55% = 11%) = 44%. Quadruplicando l'impianto si può spingere l'efficienza termodinamica di processo al 60%, ma essa è penalizzata dalla sottrazione del 40% del 60% = 24%, con che l'efficienza utile scende al 36% e così via.

Ecco dunque che è illusorio perseguire, con la tecnologia attuale, un aumento di efficienza termodinamica sovradimensionando l'impianto. Per ottenere un reale beneficio è necessario un miglioramento tecnologico dell'impianto o del processo. In altre parole: materiali più pregiati e meno costosi, temperature più alte, processi più complicati, nuove scoperte.

Mentre si può valutare come è cambiata nel tempo l'efficienza termodinamica relativa alla sola exergia di processo, dell'exergia di impianto sono assai incerti persino i dati contemporanei e i dati passati sono ricostruibili con enorme difficoltà. Si tratterebbe di affrontare un immane lavoro di tecnologia storica, se si volesse valutare il costo energetico di un impianto, progettato e costruito ad esempio nel 1920, introducendovi i materiali allora utilizzati assieme alle relative tecniche di

lavorazione con i costi energetici dei singoli elementi e con i combustibili allora disponibili. Quel che è certo è che l'efficienza vera (di impianto e di processo) è inferiore a quella apparente (valutata, cioè, sui soli dati di processo), mentre è assai probabile (sebbene non certo) che l'exergia di impianto - prendendo ancora come esempio la centrale termoelettrica alimentata con olio combustibile o con gas naturale - tenderà ad avere una statura sempre più elevata rispetto all'exergia di processo. Da queste considerazioni si deve trarre la morale che il «risparmio» è un campo di ricerche e di applicazioni, allettante sì, ma anche molto scivoloso: è facile commettere errori, che non sono più rimediabili fino a consumazione o obsolescenza dell'impianto progettato imprudentemente. E ci si deve convincere che il risparmio energetico perseguito attraverso l'aumento dell'efficienza si accompagna a una crescente complicazione degli impianti, in cui entra l'energia.