

USO RAZIONALE ED EFFICIENTE DELL'ENERGIA

RICCARDO BASOSI

Dipartimento di Chimica, Università di Siena

La struttura del secondo principio della Termodinamica collega un corpo di conoscenze molto importanti e relative alla spontaneità e all'irreversibilità dei fenomeni naturali, al grado di ordine e di disordine dell'universo e al significato della probabilità e dell'informazione. L'affermazione chiave del secondo principio è quella che i fenomeni spontanei che costituiscono gli eventi reali del mondo in cui viviamo portano sempre a stati che sono meno ordinati e più probabili e che contengono meno informazione rispetto agli stati da cui hanno preso l'avvio. Questo significa che ogni processo irreversibile spontaneo diminuisce l'ordine dell'universo e lo porta verso uno stato più probabile che contiene meno informazione di prima: qualunque cosa accade nel mondo porta nella direzione di questo baratro. Il secondo principio dice che anche processi naturali di questo tipo possono essere invertiti mediante applicazione di energia, ma ciò può essere fatto solo a spese di un ulteriore decadimento dell'ordine complessivo del mondo e cioè con un aumento dell'Entropia.

Questi elementi risultano particolarmente significativi nelle attività di produzione di Energia che sono sempre accompagnate da un aumento dell'Entropia e conseguente riduzione della Complessità Ambientale.



Figura 1. Effetti sull'ambiente delle piogge acide provocate dall'impianto di una centrale a carbone.

La crisi dei tre sistemi *ambiente, sistema produttivo e sistema economico* non sembra risolvibile intervenendo su di loro separatamente. La possibile soluzione coinvolge complesse interazioni tra i tre sistemi in cui si sviluppa l'attività umana, vedi [4], [5] e [7]. Infatti il sistema economico vive sui beni forniti dal sistema produttivo che si fonda sulle risorse dell'ecosistema. Se tutto funzionasse secondo un ideale razionale il sistema economico dovrebbe adattarsi alle necessità dell'ecosistema, ma nella realtà essendo il sistema economico basato sulla massimizzazione del profitto tenderà ad imporre

al sistema produttivo una organizzazione che di fatto porta a scaricare diseconomie sull'ambiente e quindi a degradare l'ecosistema. In questo sistema complesso il legame tra i tre sottosistemi fondamentali è espresso dall'Energia. Essa, irradiata dal sole, governa i grandi cicli ecologici, estratta dai combustibili fossili muove i processi produttivi, infine il suo uso è alla base della efficienza e della produttività economica.



Figura 2. Schema delle connessioni tra i sistemi economico, produttivo ed ecosistemi.

Lo strumento per penetrare i segreti dell'Energia è offerto dalla Termodinamica, la scienza che ne studia i flussi e le trasformazioni, vedi [6], [8].

1. Termodinamica e unidirezionalità del tempo

Il primo Principio della Termodinamica dice che l'Energia dell'universo è costante. Il secondo Principio dice che l'Entropia dell'Universo aumenta sempre. Insieme ci dicono che la scala termodinamica della qualità dell'Energia è una scala molto facile da discendere e molto difficile da risalire. Infatti se pur è vero che l'Energia è un concetto astratto che si esplica in forme molto diverse, tali forme non sono equivalenti e possiedono qualità pratiche ed anche economiche molto diverse. Tali qualità più o meno nobili sono ben espresse da una scala di valori di Temperatura.

La Termodinamica è molto diversa dalle altre discipline fisico/sperimentali. In primo luogo perché la maggior parte delle leggi della fisica è stata stabilita allo scopo di spiegare processi che accadono spontaneamente in natura (per es. una mela che cade sulla testa di Newton suggerisce l'esistenza della legge di gravitazione universale, il pendolo di Galileo ecc.). Le leggi della Termodinamica sono nate in modo opposto essendo basate sul fatto sperimentale che qualcosa concepito dagli esseri umani non può accadere in natura e che un concetto eminentemente umano come il moto perpetuo non può essere realizzato effettivamente. Come dice il grande Feynman, la Termodinamica razionalizza l'insuccesso umano: è quindi più umana delle altre scienze ed è più facile da usare che da capire. L'altra questione che rende la Termodinamica diversa dalle altre scienze è il fatto che in essa è implicita la distinzione tra passato e futuro. Questo aspetto, che sembra molto distante da qualsiasi quotidiana pratica energetica, è invece intimamente connesso con essa. Consideriamo per esempio una brocca che cade da una certa altezza

e si rompe. Al momento della rottura succede qualcosa di importanza cosmica: la cessione al pavimento e ai pezzi rotti di una infinitesima quantità di calore che non è più recuperabile. È proprio questa infinitesima quantità di calore che impedisce che il fenomeno della brocca che cade sia reversibile. Infatti se proiettiamo il film della brocca che cade all'incontrario, e vediamo i pezzetti della brocca rimettersi insieme da soli e poi la brocca saltare di nuovo sul tavolo da cui è caduta, si ride. Ridendo esprimiamo la coscienza generale che quel fatto reso possibile dal trucco cinematografico nella vita reale non succede mai. Nella vita reale le brocche cadono e si rompono. Non capita mai che si ricompongano da sole e saltino sui tavoli. Se facciamo la stessa esperienza con una palla da biliardo che batte contro una sponda, e proiettiamo il film prima in un modo e poi al contrario non sapremo mai quando/dove dobbiamo ridere.

Tutto ciò ci dice che la meccanica è simmetrica rispetto al tempo mentre la Termodinamica no. Essa contiene implicitamente la percezione universale dello scorrere del tempo in un'unica direzione.

Immaginiamo un tavolo da biliardo diviso in due parti da una barriera mobile e supponiamo che da una parte vi sia un certo numero di palle rosse e dall'altra un egual numero di palle bianche. Supponiamo inoltre che il piano sia del tutto privo di attrito in modo che le palle possano muoversi, saltellare, urtarsi ed andare qua e là proprio come le molecole d'acqua. All'interno di ciascun gruppo di palle, il moto è del tutto casuale, ma ciascuna parte del tavolo è dotata di un certo ordine, dato che le palle rosse restano da una parte della barriera e quelle bianche dall'altra. Rimuoviamo ora la barriera. Se l'agitazione delle palle continua, le palle rosse e quelle bianche gradualmente si mescoleranno fino a che entrambi i tipi saranno, in media, ugualmente distribuiti su tutta l'estensione del tavolo. Il mescolamento, la scomparsa dell'ordinata separazione delle palle è un processo inevitabile, spontaneo ed unidirezionale. Filmando l'intero processo e proiettando la pellicola al contrario si potrebbe infatti assistere al fenomeno paradossale in cui un raggruppamento casuale di palle rosse e bianche gradualmente si riordina fino a separarsi in due gruppi, uno di sole palle rosse ed uno di sole palle bianche. Questo esperimento ideale dimostra come il processo reale sia spontaneo ed irreversibile, è una delle molte dimostrazioni dell'unidirezionalità del tempo e di un evento naturale il quale crea di per sé disordine *se avviene all'interno di un sistema che sia inizialmente ordinato*.

Si sono finora usati i termini di *ordine* e *disordine* secondo il loro normale uso nel linguaggio comune; poiché il concetto che regola la definizione termodinamica di ordine avrà un ruolo cruciale nel valore pratico delle leggi energetiche, a questo punto è utile stabilire cosa significa ordine nel senso più restrittivo. In ciascuno dei casi precedenti il disordine è rappresentato da una situazione in cui l'apparenza esterna dell'oggetto è consistente con un gran numero di possibili disposizioni interne diverse, mentre l'ordine aumenta quando l'apparenza esterna ne permette un numero minore. Così, vari mucchi di legname possono avere lo stesso aspetto esteriore pur avendo al loro interno le singole tavole disposte in migliaia di modi diversi. Però, se le stesse

tavole di legno devono avere l'apparenza esteriore di una capanna, il numero delle possibili disposizioni interne è molto ridotto. In altri termini, la struttura complessiva di una capanna consente un numero di disposizioni interne delle tavole minore di quello consentito dalla struttura di un mucchio di legna.

Così, in senso termodinamico, l'ordine è una misura del livello al quale le proprietà complessive di un sistema fisico determinano la selezione di una particolare disposizione interna delle parti costituenti.

L'ordine esprime la relazione tra le proprietà dell'interno e le proprietà delle sue parti; ordine significa che il totale non è una semplice somma delle proprietà delle parti ma che è fortemente influenzato dalle relazioni fra di esse, in particolare dal modo in cui queste relazioni sono limitate o costrette. Il totale, l'intero costituisce quindi un *sistema* il cui comportamento è notevolmente influenzato dalla sua struttura interna. Come si è detto prima, i processi spontanei ed irreversibili sono gli eventi che materializzano il trascorrere unidirezionale del tempo e il sistema che ne partecipa termina con un grado di ordine inferiore a quello che aveva all'inizio. È l'esistenza di un ordine precedente che ci fornisce un modo per valutare il passare del tempo.

Sono queste le basi del secondo principio della termodinamica che, assieme al primo principio, regola il rendimento di un processo energetico. Il secondo principio afferma un solo fatto, ma di importanza cosmica: *l'Universo diventa costantemente ed irreversibilmente meno ordinato di quello che era.*

Questo comportamento dell'Universo spiega l'unidirezionalità degli eventi e l'irrimediabile passare del tempo. Anche la probabilità entra nel quadro poiché è fondamentalmente connessa con la presenza dell'ordine nel mondo. *La probabilità è una dichiarazione circa la verosimiglianza del manifestarsi di un certo particolare evento fra tutti i possibili eventi che possono manifestarsi in un dato sistema.* Le combinazioni di 4 numeri sono date da $4!$ (4 fattoriale = $4 \times 3 \times 2 \times 1$) e cioè 24 possibilità. La disposizione ordinata è una o al massimo due su 24. Con 52 carte la disposizione ordinata è una su $52!$ (cioè oltre 80miliardi di possibilità).

Così se il numero di possibili alternative è piccolo, la probabilità di ciascuna è alta. La relazione fra probabilità e ordine è quindi evidente: una bassa probabilità corrisponde ad una scelta particolare fra molte possibilità ed è equivalente all'ordine, corrispondente al fatto che le parti di un sistema possono assumere solo alcune tra le molte possibili disposizioni interne. Poiché sappiamo che con il passare del tempo una disposizione ordinata diventerà spontaneamente meno ordinata, ne segue che una situazione improbabile tenderà con il passare del tempo a trasformarsi in una situazione più probabile. Questo è un altro modo di enunciare il secondo principio della termodinamica: *ogni sistema lasciato a se stesso tenderà in media a raggiungere lo stato con una probabilità massima.*

Si noti che il secondo principio non sostiene che il sistema passerà necessariamente in una configurazione più probabile, ma solo che questo accadrà in *media*, cioè qualche particolare cambiamento potrà andare in un altro senso, ma con bassa probabilità.

D'altra parte la probabilità è strettamente connessa con l'informazione. La teoria dell'informazione è un aspetto relativamente nuovo della scienza che ha recentemente assunto una notevole importanza pratica a causa delle sue implicazioni nel campo della progettazione dei calcolatori. Un calcolatore genera informazioni che selezionano una certa configurazione di scelte in una serie di alternative possibili; una scelta è normalmente determinata dalla posizione chiusa o aperta di un interruttore. La scelta di una delle due possibili posizioni dell'interruttore rappresenta una unità di informazione cioè il *bit*. Il programma del calcolatore specifica la posizione che deve essere assunta da ciascuno di una serie di interruttori interconnessi, e la quantità totale di informazione interessata è la somma dei bit che rappresentano le scelte fatte a tutti gli interruttori.

In termini molto generali, *l'informazione consiste nell'esclusione di alcune tra le possibili disposizioni alternative di un sistema*. L'informazione è quindi analoga ad una diminuzione di probabilità e ad un aumento di ordine, per cui il secondo principio può essere enunciato: *ogni processo spontaneo ed irreversibile che si realizza in un sistema isolato dà come risultato una diminuzione di informazione*.

Le formule chimiche delle strutture ordinate mostrate in Fig.3 rappresentano situazioni estremamente improbabili e ad alto contenuto di informazione.

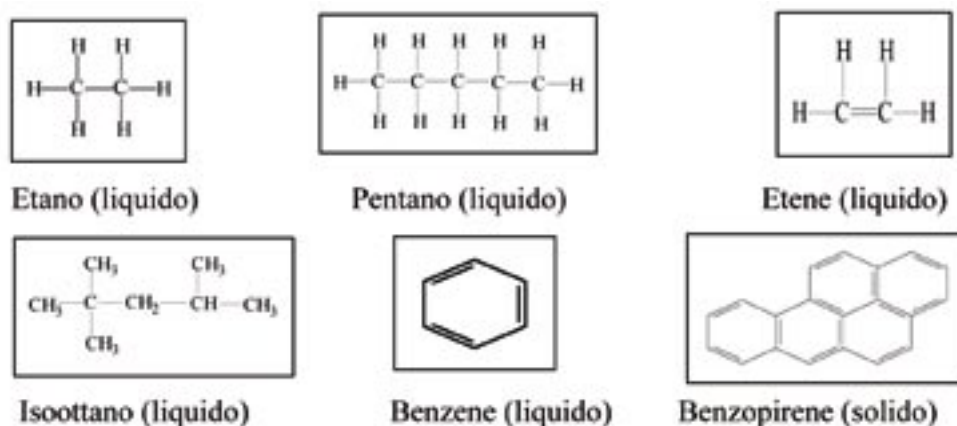


Figura 3. Formule chimiche di alcuni idrocarburi con crescente ordine strutturale.

Questa informazione è stata accumulata nei combustibili fossili dalla natura nel corso di milioni di anni. Il mondo moderno consuma quantità immense di informazione bruciando i combustibili fossili per ottenere anidride carbonica e vapor acqueo che divengono così i principali responsabili dell'effetto serra e non sono più utilizzabili per usi qualificati. La intrinseca scarsità delle fonti fossili può essere dedotta dalla Fig.4 che mostra come ai *trend* attuali di consumo la durata delle riserve sia molto limitata ad eccezione della fonte carbone per la quale comunque sussistono problemi ambientali irrisolti. L'uranio per uso civile (produzione di energia elettrica), per il quale l'impatto ambientale imputabile al confinamento sicuro delle scorie è ancora una questione aperta, con rischi difficilmente calcolabili, come si può vedere dovrebbe sparire prima del petrolio. Non è quindi una possibile soluzione del problema.

	RISERVE ACCERTATE (MILIARDI DI TEP)	CONSUMO ATTUALE (MILIARDI DI TEP)	DURATA RISERVE (ANNI)
PETROLIO	135	3.2	42
GAS NATURALE	120	1.8	67
CARBONE	540	2.3	235
URANIO	18	0.6	27

Figura 4. Riserve accertate, consumi attuali (in Miliardi di Tonnellate equivalenti di petrolio) e durata (anni) sulla base dei consumi attuali per le principali fonti primarie di energia.

I vincoli di natura ambientale imposti dall'applicazione del protocollo di Kyoto, recentemente divenuto legge internazionale, possono trasformarsi in una grande opportunità di sviluppo tecnologico ed economico se le politiche energetiche cammineranno sulle due gambe rappresentate dall'uso razionale ed efficiente dell'energia e sullo sviluppo delle fonti rinnovabili. In questo quadro il vettore energetico del futuro, pulito ed efficiente potrebbe essere l'Idrogeno soprattutto se prodotto dalle rinnovabili.

L'energia pulita non esiste: l'unica energia pulita è quella che non si usa (o che non c'è bisogno di usare, quindi risparmiata). Il risparmio più significativo come si è visto è quello di secondo ordine. Più che di risparmio energetico si dovrebbe parlare quindi di risparmio entropico. In sostanza l'energia va utilizzata al livello di qualità che possiede. Per esempio ad una analisi attenta si vede che nel Paese buona parte della domanda elettrica negli usi finali, sia nell'industria che nei settori civile e terziario, è finalizzata a scopi termici. La gerarchia qualitativa delle differenti forme energetiche impone dei vincoli di cui la pianificazione energetica dovrebbe tenere conto in fase di programmazione/installazione di nuovi impianti e nella fase di riordino del sistema. In un ottica integrata, ci si dovrebbe basare sui concetti di 'localizzazione' e di 'uso razionale' dell'energia. La localizzazione consiste nella mappatura o georeferenziazione delle diverse tipologie di domanda energetica presenti sul territorio: si tratta in pratica di localizzare i siti dove viene richiesta principalmente energia termica a bassa temperatura piuttosto che i siti dove invece è preminente la domanda elettrica. La necessità di localizzare la domanda termica è dettata dalla termodinamica. Il trasferimento di calore a distanza è ovviamente soggetto a fenomeni di dispersione e di raffreddamento; questo impone che l'installazione di centrali (cogenerative o meglio trigenerative) con funzioni preminentemente termiche (e di raffrescamento), debba essere posizionata a più breve distanza possibile dall'utenza finale. Le stesse ragioni termodinamiche impongono vincoli sulla dimensione, o la taglia, degli impianti: la possibilità di tenere conto della diversificazione della domanda e contemporaneamente ridurre i consumi di risorse

migliorando l'efficienza energetica della produzione e la razionalità negli usi finali è data tecnologicamente dalla cogenerazione con una dimensione medio-piccola degli impianti (microcogenerazione diffusa) che sembra essere la più idonea per la giusta modulazione dell'offerta alla reale domanda di energia, evitando il rischio di sprechi dovuti al sovradimensionamento. Una approfondita e puntuale georeferenziazione della domanda energetica passa inevitabilmente attraverso la costruzione di 'catasti energetici' costruiti su diverse scale territoriali dove la mappatura della domanda termica a diversi livelli di temperatura permetterà la sinergia tra settori economici anche diversi e risparmio delle risorse e dello spazio con gli strumenti indispensabili per una nuova *Governance* orientata alla decarbonizzazione dell'economia, vedi [2] e [3].

Per quanto riguarda le energie rinnovabili che rappresentano l'altro elemento irrinunciabile di un processo virtuoso per lo sviluppo di politiche energetiche più sensibili ai vincoli ambientali e territoriali non è questa l'occasione per elencarne i pregi evidenti e le grandi potenzialità connesse alla loro dimensione e distribuzione.

Ragioniamo un momento su quelli che sembrano essere gli elementi di criticità che ad oggi hanno ostacolato la penetrazione delle fonti rinnovabili più promettenti come il solare fotovoltaico e l'eolico. Come è noto nel caso del secondo è ormai raggiunta la competitività economico/finanziaria con le altre modalità più invasive di produzione elettrica. Entrambe le fonti però condividono la criticità dovuta all'intermittenza (discontinuità della fornitura) e alla scarsa densità di potenza per unità di superficie/volume. Questi 'difetti' intrinseci potranno essere superati nel futuro se queste fonti verranno usate per la produzione di idrogeno che potrebbe diventare quindi il vettore energetico della transizione. L'idrogeno infatti se prodotto dal *reforming* del metano o di altri idrocarburi di origine fossile consente indiscutibilmente di diminuire l'impatto ambientale, ma non risolve il problema strutturale della scarsità delle fonti fossili oltre a quello di una perdita exergetica notevole. Se prodotto invece dalle rinnovabili unirebbe il vantaggio ambientale a quello di non condividere con le fonti di partenza il problema della limitata stoccabilità e della bassa densità di potenza. Le stime recenti sullo sviluppo del fotovoltaico e dell'eolico sono molto incoraggianti per questa prospettiva con incrementi nella produzione di moduli Fv del 36% in Giappone nel 2003 e con incrementi del 24% sull'anno precedente per l'eolico in Europa negli ultimi due anni grazie soprattutto alla Germania, [1].

Un ruolo significativo potranno averlo anche le biomasse (e tutte le forme ad esse correlate come biogas e/o biodiesel) che non presentano il problema della discontinuità e che vengono valorizzate dall'entrata in vigore del Protocollo di Kyoto. Insieme ad iniziative legislative orientate a favorire lo sviluppo diffuso delle rinnovabili, la prospettiva del loro uso per produrre idrogeno è forse il dato tecnologico più promettente per un futuro più pulito che releghi il petrolio ad un ruolo residuale, come il petrolio ha fatto nel secolo scorso per il carbone. In ultima analisi considerato che il nucleare è messo fuori gioco dalla irrisolta questione delle scorie, prima ancora che dai rischi di incidente catastrofico, il futuro non dovrà avere le forme di un ritorno al passato

con l'opzione carbone (e i costi ambientali ed economici che le norme di Kyoto non potranno non penalizzare), ma di un atto di ottimismo verso vettori e tecnologie pulite come l'idrogeno prodotto da rinnovabili.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Basosi R., Prospettive della politica energetica, l'Italia dopo Kyoto e verso il terzo millennio, *La Chimica e l'Industria*, 5, 2005, pp. 48-51.
- [2] Basosi R., Verdesca D., *Politiche energetiche per enti locali e regioni*, Il Sole24Ore, Milano 2005, pp. 1-468.
- [3] Basosi R., Verdesca D., L'energia delle regioni, *QualEnergia*, 5, 2005, pp. 60-63.
- [4] Commoner B., *La povertà del potere*, tr. it. Garzanti, Milano 1976.
- [5] Commoner B., *Il cerchio da chiudere*, tr. it. Garzanti, Milano 1973.
- [6] Feynman R. P., Leighton R. B., Sands R., Masson M., *La fisica di Feynman*, tr. it. Zanichelli, Bologna 2001.
- [7] Tiezzi E., *Tempi storici, tempi biologici*, Garzanti, Milano 1984.
- [8] Zemansky M. W., *Calore e termodinamica*, Zanichelli, Bologna, 1981.